



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
Programa de Investigación, Estudios Nacionales
y Servicios del Ambiente (PIENSA)



**Variaciones en el desempeño de lagunas de estabilización y
humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales
domésticas en la estación experimental de León, 1998-1999.**

Tesis para optar al título de:

Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental

Tesista:

Ingeniera Noelia María Lazo Soza

Tutor:

M.Sc. Ingeniero Miguel Blanco Chávez

Managua, Nicaragua, noviembre de 2019

DEDICATORIA

Para mis hijos Diego Noel y María Luciana, quienes son el motor que impulsan mis acciones. Que la culminación de mi Tesis sea un ejemplo de perseverancia y que los motive a cumplir sus metas a pesar del tiempo y de las circunstancias.

AGRADECIMIENTOS

A DIOS quien me bendice con salud y sabiduría para llevar a cabo mis actividades día a día y me ha permitido culminar esta etapa profesional.

Al Profesor, Ph.D. Marcel Donze, de la Universidad TUDelft, Holanda, quien fue parte fundamental de esta investigación y compartió incondicionalmente sus conocimientos para la elaboración de esta Tesis durante mi estadía en dicha Universidad.

A mi comité de Tesis, M.Sc. Miguel Blanco, M.Sc. Sergio Gámez y M.Sc. Carlos Vanegas quienes contribuyeron con su experiencia a la mejora de esta investigación.



Universidad Nacional de Ingeniería
Programa de Investigación, Estudios Nacionales
y Servicios del Ambiente (PIENSA-UNI)



Managua, 23 de octubre, 2018
CMAP-053-18

Ing. Noelia María Lazo Soza
Maestría en Ciencias en Ing. Ambiental
XVIII Ciclo (2000-2001)

Estimada Ingeniera:

Reciba cordial saludo. Por este medio le comunico oficialmente la **aprobación** de su protocolo de tesis, titulado: **Variaciones en el desempeño de lagunas de estabilización y humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales domésticas en la estación experimental de León, 1998-1999.**

Su protocolo de tesis, así como la tutoría del M.Sc. Ing. Miguel Enrique Blanco Chávez, fueron unánimemente aprobados mediante **acuerdo N° 3** de la sesión ordinaria **No. 07-2018**, del Comité Académico del PIENSA, realizada en la sala de maestría N° 1, el lunes 8 de octubre del año en curso.

Debo señalarle que el cronograma de actividades contenido en su protocolo no incluye fecha de presentación de avances intermedios ante su Comité de Tesis, pero debe ponerse de acuerdo con su tutor para realizar al menos dos encuentros con ellos para seguimiento de dichos avances. Le sugiero que programen uno en diciembre 2018 y otro en febrero 2019.

Se espera la entrega de su informe final de tesis a finales de marzo de 2019, de manera que su predefensa y defensa de tesis están previstas a desarrollarse durante el mes de abril de ese mismo año. En nombre de nuestro programa le deseo el mayor de los éxitos. Atte.


M.Sc. Ing. Luz Violeta Molina C.
Coordinadora Maestrías PIENSA



cc. M.Sc. Ing. Larisa Korsak, Directora PIENSA.
M.Sc. Lic. Elda H. Escobar, Secretaria Académica PIENSA.
M.Sc. Ing. Miguel Enrique Blanco, Tutor de tesis
M.Sc. Ing. Sergio Rafael Gámez, Miembro del Comité de Tesis
M.Sc. Ing. Carlos Miguel Vanegas Miembro del Comité de Tesis
Archivo Maestrías PIENSA
Expediente estudiantil de tesista



Universidad Nacional de Ingeniería
Programa de Investigación, Estudios Nacionales y Servicios del Ambiente



Managua, 22 de agosto de 2019

Ing. Luz Molina Gómez
Coordinación Maestrías Ambientales PIENSA
Sus Manos.-

Estimados colegas:

Por este medio, los suscritos miembros del Comité de Tesis asignado a la Ing. Noelia María Lazo Soza, estudiantes de la **Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental del ciclo académico 2000-2001**, damos aval del Informe de tesis titulado: **VARIACIONES EN EL DESEMPEÑO DE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN Y HUMEDALES CONSTRUIDOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN LA ESTACIÓN EXPERIMENTAL DE LEÓN, 1998-1999.**

Verificamos que el Informe de investigación cumple el objetivo general propuesto. Consideramos que puede ser sometido al Jurado Calificador que designe el PIENSA.


M.Sc. Ing. Miguel Enrique Blanco Chávez
Miembro del Comité de Tesis


M.Sc. Ing. Sergio Gámez Guerrero
Miembro del Comité de Tesis

cc. Tesistas

RESUMEN

En Nicaragua, en el año 1996 se construyó un sistema de lagunas de estabilización y humedales con el fin de mejorar las condiciones de tratamiento de las aguas residuales de una parte de la ciudad de León. El sistema además sirvió como una estación experimental en donde se llevó a cabo un programa de investigación entre Mayo 1998 y Diciembre 1999 con el propósito de determinar si había diferencias entre el uso de lagunas convencionales y lagunas con plantas macrófitas. Las etapas investigativas dieron como resultado una gran cantidad de datos sobre parámetros monitoreados en el influente y efluente de las lagunas convencionales y humedales construidos.

En la presente investigación se trató de realizar un análisis más profundo de los datos recopilados y extraer la máxima cantidad de conclusiones a partir de ellos. El uso del Análisis Exploratorio de Datos y elementos de estadística descriptiva permitió el estudio del comportamiento de los conjuntos de datos, detectar anomalías o valores atípicos y tendencias.

Las principales conclusiones del estudio establecen que la inexactitud y el grado de precisión en las mediciones de niveles de agua en las lagunas afectan el cálculo de caudales y por ende el balance de agua de los sistemas. Esta afectación en el régimen de caudales influye directamente al calcular la eficiencia de remoción de un sistema basado en cargas de contaminantes. Los sistemas presentan mejor eficiencia de remoción basado en cargas que en remoción de concentraciones. La diferencia entre la entrada y la salida debido al efecto de la evapotranspiración, el déficit de agua y la inexactitud en el cálculo del balance de agua influyen en este comportamiento.

Las diferencias entre el rendimiento de las lagunas con plantas macrófitas y sin plantas fueron de 14% en el caso de DBO₅, 7% para DQO y 4% para Sólidos Suspendidos. Para estos parámetros no hay una mejora significativa en la eficiencia de los sistemas al cultivar plantas acuáticas en lagunas de aguas residuales. Únicamente para el parámetro Fósforo total se presentó una mejora de 30% con el uso de Lemna.

ABSTRACT

In 1996 a system of stabilization lagoons and wetlands was built to improve the wastewater treatment of the city of León, Nicaragua. The system also served as an experimental station where a research program was carried out between May 1998 and December 1999 with the purpose of determining whether there were differences between the use of conventional lagoons and lagoons with macrophyte. The research gave as a result a large amount of data on parameters monitored in the influent and effluent of the conventional lagoons and constructed wetlands.

In this investigation, we tried to perform a deeper analysis of the data collected and extract the maximum number of conclusions from them. The use of the Exploratory Data Analysis and descriptive statistics elements allowed the study of the behavior of the data sets, detecting anomalies, outliers and trends.

The main conclusions of the study establish that the inaccuracy and the degree of precision in the measurements of water levels in the lagoons affect the flow calculations and therefore the water balance of the systems. This impact on the flow regime directly influences the calculation of the removal efficiency of a system based on pollutant loads. The systems have better removal efficiency based on loads than on concentration removal. The difference between inlet and outlet because of evapotranspiration, water deficit and inaccuracy in the calculation of the water balance influence this behavior.

The differences between the efficiency of the lagoons with macrophyte and without plants were 14% in the case of BOD₅, 7% for COD and 4% for Suspended Solids. There is no significant improvement in system efficiency for these parameters when growing aquatic plants in sewage lagoons. Only Total Phosphorus presented an improvement of 30% with the use of Lemna.

ÍNDICE

	Página
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO II. HIPÓTESIS.....	7
CAPÍTULO III. OBJETIVOS.....	8
CAPITULO IV. MARCO TEÓRICO	9
4.1 Lagunas de Estabilización	9
4.2 Humedales construídos	10
4.3 La teoría de la caja negra para el analisis de sistemas.	12
4.3.1 El modelo de la caja negra aplicado a condiciones hidráulicas.	14
4.3.2 El modelo de la caja negra aplicada a las concentraciones de las sustancias.	15
4.3.3 El modelo de la caja negra aplicada a las cargas.	17
4.4 Análisis de datos de humedales desde diferentes puntos de vista basados en la teoría de la caja negra.....	18
4.3 Eficiencia basada en concentraciones versus eficiencia basada en cargas.....	23
4.4 Ecuación de balance	24
4.4.1 Ecuación de balance del agua.....	27
4.5 Tiempo de retención hidráulico para sustancias conservativas y no conservativas.....	31
CAPÍTULO V. DISEÑO METODOLÓGICO	32
5.1 Descripción de la estación experimental de León.....	33
5.2 Identificación de los datos a utilizar procedentes de la estación experimental de León	35
5.3 Matriz de operacionalización de variables	36
5.4 Metodología de análisis.....	40
CAPÍTULO VI. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	41
6.1 Régimenes de caudales y su variabilidad en las lagunas.....	41
6.2 Análisis de la variabilidad del desempeño de las lagunas basado en mediciones de concentraciones de contaminantes y en mediciones de cargas contaminantes.	64
6.3 Estimación de la variabilidad en el desempeño de las lagunas convencionales y humedales construidos.....	77
CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES.....	87

CAPÍTULO VIII. RECOMENDACIONES	89
CAPÍTULO IX. BIBLIOGRAFÍA	90
CAPÍTULO X. ANEXOS	95

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Sistema de tratamiento con mácrofitas emergentes y flujo de agua horizontal subsuperficial.	11
Figura 2. Sistema de tratamiento con macrófitas emergentes y flujo superficial.....	11
Figura 3. Sistema de tratamiento con macrófitas sumergidas.....	12
Figura 4. Sistema de tratamiento con macrófitas flotantes.....	12
Figura 5. El modelo de la caja negra.....	13
Figura 6. El modelo de la caja negra aplicada a las concentraciones de las sustancias.....	17
Figura 7. Un sistema de tratamiento compuesto de dos humedales.....	21
Figura 8. Un sistema de dos humedales analizado como una sola caja negra.....	21
Figura 9. Dos humedales analizados en forma comparativa.....	22
Figura 10. La ecuación de balance.....	24
Figura 11. La ecuación de balance para sustancias no conservativas.....	26
Figura 12. Influentes y efluentes en el balance de agua.....	28
Figura 13. Esquema de las lagunas en la estación experimental de León, puntos de medición de caudal y muestreos de parámetros de calidad del agua.....	34
Figura 14. Flujos en las entrada y salida de las lagunas primarias, 23, 24, 25 y 26 de Noviembre de 1999, medidos a intervalos de 2 horas.....	42
Figura 15. Flujos en las entrada y salida de las lagunas primarias, 23, 24, 25 y 26 de Noviembre de 1999, medidos a intervalos de 2 horas.....	43
Figura 16. Gráfico de cajas de los flujos de entrada a las lagunas primarias.....	44
Figura 17. Flujos a la salida de las lagunas primarias.....	44
Figura 18. Gráficos de caja de los influentes de la laguna secundaria A1.....	45
Figura 19. Gráfico de cajas de los efluentes de la laguna A1.....	46

Figura 20. Comportamiento de flujo entrante y saliente las lagunas primarias durante un periodo lluvioso.....	49
Figura 21. Comportamiento del flujo de entrada y salida de las lagunas secundarias A1 durante período lluvioso.....	50
Figura 22. Gráfico de cajas de las concentraciones de DBO ₅ en los canales de entrada y salida de las lagunas de la estación experimental.....	65
Figura 23. Gráfico de cajas para la relación Salida/Entrada de DBO ₅ para las lagunas primarias y secundarias.....	68
Figura 24. Gráfico de cajas para las concentraciones de DQO en los canales de entrada y salida de las lagunas de la estación experimental.....	71
Figura 25. Gráficos de caja para las concentraciones de sólidos suspendidos en los canales de entrada y salida de las lagunas en la estación experimental.....	73
Figura 26. Cargas de DBO ₅ en las entrada y salida de las lagunas secundarias.....	76
Figura 27. Cargas de DBO ₅ en las entrada y salida de las lagunas secundarias de la estación experimental escaladas como porcentaje de la Mediana.....	76
Figura 28. Remoción de cargas de DBO ₅ y remoción de concentraciones de DBO ₅ para las lagunas secundarias A1, A2, A3, B y C de la estación experimental.....	78
Figura 29. Remoción de cargas de DQO y remoción de concentraciones de DQO para las lagunas secundarias A1, A2, A3, B y C.....	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Diferentes niveles de análisis para un sistema de humedales.....	19
Tabla 2. Número de datos para análisis de caudales y balance de agua.....	35
Tabla 3. Cantidad de datos para análisis del desempeño de las lagunas	36
Tabla 4. Matriz de operacionalización de variables.....	37
Tabla 5. Valores atípicos en el influente de las lagunas primarias	48
Tabla 6. Valores atípicos en el efluente de las lagunas primarias.	48
Tabla 6. Diferencias entre influente y efluente para cada intervalo, día 15 de Abril	52
Tabla 7. Cambio en el volumen de cada laguna para cada intervalo medido, día 15 de Abril.....	52
Tabla 8. Valores de Δ (Delta) para cada intervalo medido ($\Delta = \text{m}^3/\text{s}$), día 15 de Abril.	53
Tabla 9. Valores de Δ (Delta) para cada intervalo medido ($\Delta = \text{mm}$), Día 15 de Abril.	53
Tabla 10. Balance de agua diario para las lagunas primarias.	57
Tabla 11. Balance de agua diario para la Laguna A1.....	58
Tabla 12. Balance de agua diario para la Laguna A2.....	59
Tabla 13. Balance de agua diario para la laguna A3.....	60
Tabla 14. Balance de agua diario para la Laguna B.....	61
Tabla 15. Balance de agua diario para la Laguna C.....	62
Tabla 16. Análisis estadístico de la influencia de la evaporación en el valor de $\Delta 1$	63
Tabla 17. Resumen estadístico para los datos de DBO_5 , en mgO_2 por litro.....	66
Tabla 18. Comparación de las diferencias en la media de DBO_5 con la suma del error estándar de la media para todos los pares de lagunas secundarias.	66
Tabla 19. Resumen estadístico para la relación Salida/Entrada DBO_5 de las lagunas primarias (P) y lagunas secundarias (A1, A2, A3, B y C).....	69

Tabla 20. Valores de Δ para la media y Σ del error estándar de la media para la relación Salida/EntradaDBO ₅ para todas las lagunas.	69
Tabla 21. Resumen estadístico para los datos de DQO (mg/l).....	72
Tabla 22. Comparación de las diferencias en las medias de DQO con la suma de los errores estándar de las medias para todos los pares de lagunas secundarias	72
Tabla 23. Resumen estadístico para los datos de sólidos suspendidos.....	74
Tabla 24. Comparación de las diferencias en las medias de sólidos suspendidos con la suma de los errores estándar de las medias para todos los pares de lagunas secundarias.	74
Tabla 25. Eficiencias de remoción de nitrógeno total basadas en concentraciones y en cargas para dos celdas de la estación experimental, una celda con Lemna y la otra convencional con alga.....	80
Tabla 26. Concentraciones de entrada (CE) y salida (CS) de Nitrógeno total para las celdas A1 y A3. Eficiencias basadas en concentraciones.....	82
Tabla 27. Cargas de nitrógeno total aplicadas y remanentes para las celdas A1 y A3. Eficiencias basadas en cargas.....	82
Tabla 28. Influentes y Efluentes de las celdas A1 y A3	82
Tabla 29. Diferencias entre el desempeño de las lagunas con algas y lagunas con planta macrófitas.....	86

ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

A:	Almacenamiento
AED:	Análisis Exploratorio de Datos
C:	Caudal
Ce:	Caudal entrada
Cs:	Caudal salida
Conc:	Concentración
ENACAL:	Empresa Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados
Loess:	Locally weighted scatterplot smoothing
NIST:	National Institute of Standards and Technology
TRH:	Tiempo de retención hidráulico
TUDELFT:	Deflt University of Technology
UNAN:	Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua
UN-HABITAT:	United Nations Human Settlements Programme
UNI:	Universidad Nacional de Ingeniería
USEPA:	United States Environmental Protection Agency

SIMBOLOS

CH ₄ :	Metano
cm:	Centímetro
CO ₂ :	Dióxido de Carbono
DBO ₅ :	Demanda Biológica de Oxígeno
DQO:	Demanda Química de Oxígeno
Δ:	Delta
E:	Evaporación
ET:	Evapotranspiración
Ha:	Hectárea
I:	Infiltración
kg:	Kilogramo
m ³ :	metros cúbicos
mg/L:	miligramos por litro
ml:	mililitros
N:	Nitrógeno
N ₂ :	Gas nitrógeno
N ₂ O:	Óxido de nitrógeno
NH ₃ :	Amoníaco
NH ₄ :	Amonio
NMP:	Número más probable
NO ₂ :	Dióxido de nitrógeno
NO ₃ :	Nitrato
OD:	Oxígeno Disuelto
P:	Fósforo
PO ₄ :	fosfatos
SiO ₂ :	Dióxido de Silicio
SST:	Sólidos Suspendidos Totales
ST:	Sólidos Totales
T:	Temperatura

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de tratamiento naturales representan una alternativa simple en construcción y operación para países en vías de desarrollo (United Nations Human Settlements Programme [UN-HABITAT], 2008). Estos tipos de sistemas son llamados humedales construidos, ya que ellos reproducen la capacidad de tratamiento de los humedales naturales, los cuales han recibido y tratado las descargas de aguas residuales desde civilizaciones antiguas.

En Nicaragua, en el año 1998 se construyó un sistema de lagunas de estabilización para el mejoramiento de las condiciones de tratamiento de las aguas residuales de una parte de la ciudad de León.

En este sistema se llevó a cabo un programa de investigación entre Mayo 1998 y Diciembre 1999 que dio como resultado una gran cantidad de datos que conformaron prácticas de ingeniería sanitaria, reportes, monografías, así como múltiples publicaciones.

Los primeros resultados presentados indicaban que las diferencias entre el uso de lagunas convencionales y humedales construidos eran mínimas, no parecía haber mucha ventaja en el uso de plantas acuáticas.

La base de datos de la estación experimental León contiene información sobre parámetros monitoreados en el influente y efluente de las lagunas convencionales y humedales construidos. Los parámetros que conforman la base de datos son: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), Demanda Química de Oxígeno (DQO), fósforo total, sólidos totales, sólidos suspendidos totales, nitrógeno total, nitratos, coliformes fecales y oxígeno disuelto dentro de las lagunas. De igual forma, se tienen registros de caudales en las entradas y salidas de las unidades de tratamiento.

La eficiencia de un sistema puede ser estudiada a diferentes niveles, desde los análisis más simples hasta los estudios más complejos y profundos. El tipo de análisis se basa en puntos de vista según el investigador, sus conocimientos y la información requerida para llevar a cabo cada estudio.

La forma más simple de realizar el análisis de un sistema es basada en la teoría de la caja negra donde los procesos o reacciones que ocurren internamente no son de interés, el análisis está basado en datos de entrada y salida del sistema.

Ejemplo de estos análisis son la eficiencia de remoción basada en concentración de entrada y salida de un parámetro o sustancia analizada. También puede realizarse un análisis basado en cargas contaminantes, en este caso también se considera el caudal del sistema.

Las lagunas manejadas como sistemas controlados deberían dar resultados más exactos y por tanto se pueden establecer conclusiones más acertadas en menor tiempo y a más bajo costos. Trabajar en una dirección más científica implica que se debe dar mucha más atención a la exactitud de las mediciones ya que los estudios de campo generalmente producen datos variables.

En esta investigación se tratará de realizar un análisis más científico de los datos recopilados y extraer la máxima cantidad de conclusiones a partir de ellos, para indicar niveles de confiabilidad de las conclusiones, para indicar el nivel de precisión más allá del cual no se pueda encontrar más conclusiones, para identificar puntos débiles en los datos, los cuales después de realizar mejoras, pudiesen producir más y mejores conclusiones además de sugerir formas para realizar dichas mejoras para futuras investigaciones.

1.1 ANTECEDENTES

En 1994 debido al incremento poblacional en la ciudad de León se originaron ideas para ampliar el sistema de tratamiento de aguas residuales existente en la ciudad.

No se podían usar técnicas modernas o semi -industriales; de igual forma el uso humedales de flujo sub-superficial representaba una alternativa de altos costos de construcción y operación. Dado que existía suficiente área de terreno disponible, el uso de lagunas de estabilización era la alternativa. En ese momento surgió la pregunta sobre si el uso de lagunas de estabilización con plantas acuáticas emergentes o flotantes, como estaba siendo popular, era preferible a usar lagunas de estabilización convencionales con algas (Baldizón, 2000 b).

En aquel momento se realizó una consulta de literatura, sin embargo, no se encontraron datos o argumentos que demostraran cuál tipo de planta acuática trabajaba mejor, o más aún si existía alguna diferencia entre ellas. Las condiciones de operación de cada sistema eran conocidas solo en crudas aproximaciones. Finalmente, no se encontró estimaciones exactas sobre el área de laguna requerida por persona servida; como regla general se ha planteado que se requiere entre uno y diez metros cuadrados por persona servida con el sistema de alcantarillado.

Dado que no se encontraron respuestas en la literatura disponible se decidió construir la estación experimental de León como una planta de tratamiento con lagunas de estabilización secundarias de manera que estas además de tratar las aguas residuales domésticas de dicha ciudad, sirvieran como una planta piloto para realizar investigaciones multidisciplinarias en esta materia y como un instrumento de investigación. Ver Anexo 1, localización de la Estación Experimental.

El sistema fue diseñado para cumplir cuatro funciones:

1. Mejorar el sistema de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de León.
2. Hacer posibles investigaciones multidisciplinarias a escala internacional sobre el funcionamiento de sistemas de tratamiento semi-naturales.

3. Servir como un sitio de evaluaciones controladas para la introducción y evaluación de técnicas de medición en el campo en dependencia del tipo de planta.
4. Servir como una herramienta de enseñanza de hidráulica, ingeniería sanitaria y ambiental, así como un lugar donde entrenar personal para el monitoreo de plantas de tratamiento semi-naturales.

El primer programa de investigación en la estación experimental de León se llevó a cabo de Mayo, 1998 hasta Diciembre, 1999. El proyecto fue una cooperación entre dos comunidades, León, Nicaragua y Utrecht, Holanda, Empresa Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados (ENACAL), León y tres universidades, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (UNAN) León, Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) y Universidad Tecnológica de Delft (TUDelft).

El propósito del primer programa de investigación fue decidir sobre las posibles diferencias entre el uso de lagunas de estabilización convencionales, como es común en Nicaragua, generalmente anaeróbicas y facultativas, y el uso de humedales contruidos. Ver Anexo 2, fotos del sistema.

La principal conclusión establecida del primer programa de investigación en la estación experimental de León fue que la diferencia entre el desempeño de lagunas facultativas con algas y lagunas con plantas acuáticas emergentes o flotantes, fueron pequeñas y difíciles de detectar. Las diferencias de remoción encontradas fueron menores de 30% en algunos parámetros, o 15% como promedio general, dependiendo el dato que se considere.

Dolmus (2006) establece que las lagunas con macrófitas superaron en un 10% de remoción de cargas de DBO₅ a las lagunas facultativas.

En Nicaragua, las lagunas anaeróbicas y facultativas siguen siendo los principales sistemas utilizados para el tratamiento de las aguas residuales domésticas. Existen más de 35 plantas para el tratamiento de aguas residuales municipales administradas por ENACAL, de las cuales 17 corresponden a sistemas de lagunas de estabilización (Reyes y Vanegas C, 2017). Estos sistemas son monitoreados por dicha entidad a un nivel simple, para el conocimiento principalmente de los parámetros de descargas y determinar el cumplimiento con la normativa de descarga vigente.

1.2 JUSTIFICACIÓN

La confianza en el uso de los humedales construidos alrededor del mundo se originó de investigaciones realizadas en Europa en 1952 y en el hemisferio Oeste durante los años 70s. La implementación de esta tecnología se aceleró alrededor del mundo desde aproximadamente 1985 (Kadlec & Knight, 2009).

El interés en los humedales construidos está creciendo en los países en desarrollo donde se requiere el uso de tecnologías con costos y efectividad apropiadas. Como expresa Mara (2003) los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas deben contribuir a la sostenibilidad en la explotación de los recursos hídricos, especialmente cuando los efluentes descargan en cuerpos de agua naturales.

Si los humedales son construidos en la topografía adecuada, requieren de poca energía, lo que los hace apropiados tanto para lugares en desarrollo como para zonas rurales. Dado que la mayoría de los países en desarrollo están ubicados dentro de las zonas tropicales y sub-tropicales, podría esperarse que las condiciones climáticas, especialmente las temperaturas cálidas, favorecerán una mayor actividad biológica y, por tanto, mayor eficiencia, por lo que se hace necesario trabajar en diseños acordes para estos climas que permitan el aprovechamiento al máximo de estas tecnologías.

La inversión económica en la primera estación experimental en León se realizó con el apoyo financiero y técnico de Holanda y Nicaragua a través de las diferentes instituciones involucradas. Esta estación experimental permitió la generación de gran cantidad de información que fue utilizada en diferentes publicaciones y reportes, pero que en este estudio permitirá obtener una herramienta en la toma de decisiones para diseñadores, entidades municipales y ENACAL sobre el beneficio del uso de humedales construidos o lagunas convencionales.

¿Resultan insignificantes las diferencias observadas entre el desempeño de las lagunas de estabilización convencionales y lagunas con plantas acuáticas emergentes o flotantes en la estación experimental de León?

Considerando que los primeros resultados de estudios en la estación experimental mostraban que las diferencias de remoción entre los diferentes tipos de lagunas y humedales construidos oscilaban entre

15% y 20% para los diferentes parámetros, no demostraba que existía mucha ventaja en el uso de plantas acuáticas en lagunas de estabilización para el tratamiento de agua residual.

Estos resultados generaron la necesidad de analizar porque estas diferencias fueron tan pequeñas. Si los resultados se veían afectados por condiciones propias de cada sistema, por inexactitud en las mediciones o si los diferentes puntos de vista de análisis definían la tendencia hacia que sistema era mejor.

Por tal razón, en este estudio se utiliza la base de datos generados en la estación experimental de León para realizar un análisis más profundo sobre las diferencias encontradas entre el desempeño de las lagunas convencionales y lagunas con macrófitas.

CAPÍTULO II. HIPÓTESIS

La variabilidad en el desempeño de las lagunas convencionales y lagunas con macrófitas de la estación experimental León se debe a factores propios del sistema principalmente el régimen de flujo y el tipo de plantas acuáticas utilizadas, pero también hay influencia de factores externos como la metodología aplicada en el análisis e interpretación de los datos.

CAPÍTULO III. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar las principales causas de la variabilidad en el desempeño de lagunas de estabilización y humedales construidos de la estación experimental de León, 1998-1999.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

3.2.1 Valorar los principales parámetros que influyen la variabilidad de los caudales y el balance de agua en lagunas de estabilización y humedales construidos.

3.2.2 Analizar la variabilidad en el desempeño entre las lagunas y humedales de la estación experimental León basada tanto en las mediciones de concentraciones de contaminantes como en las mediciones de cargas de contaminantes en la entrada y salida de cada tipo de sistema.

3.2.3 Estimar la variabilidad en el desempeño de las lagunas convencionales y humedales construidos de la estación experimental de León.

CAPITULO IV. MARCO TEÓRICO

El tratamiento de las aguas residuales es un problema que ha preocupado al hombre desde que él descubrió que el descargar sus desechos en aguas superficiales podía ocasionarle problemas adicionales tales como la transmisión de enfermedades de origen hídrico y la alteración del medio ambiente. Por esa razón, se han creado muchas tecnologías para minimizar los efectos de la descarga de las aguas residuales crudas.

En los últimos 20 años, se ha expresado un interés especial en el uso potencial de una variedad de sistemas biológicos naturales para depurar el agua residual de una forma controlada. Estos sistemas de tratamiento biológicos naturales incluyen diversos tipos de lagunas de estabilización y humedales en donde el agua residual es tratada por un proceso de auto-depuración (USEPA, 1993).

4.1 Lagunas de Estabilización

Las lagunas de estabilización son sistemas que permiten el almacenamiento del agua residual por un tiempo definido según la carga orgánica a tratar lo que permite su degradación. El proceso de combinación natural del oxígeno usado por las bacterias y el oxígeno producidos por las algas que ocurre en estas lagunas, convierten los desechos orgánicos en productos finales estables y producen un efluente el cual puede ser descargado en la corriente más cercana.

Las algas son importantes en las lagunas de estabilización ya que ellas completan un ciclo natural planta-animal. Las algas utilizan CO₂, sulfatos, nitratos, fosfatos, agua, y luz solar para sintetizar su material celular y desprender oxígeno como producto. Este oxígeno, disuelto en la laguna, está disponible para las bacterias y otros microorganismos para sus procesos metabólicos, los cuales incluyen respiración y degradación de la materia orgánica presente en la laguna.

Las reacciones biológicas que ocurren dentro de las lagunas se clasifican en anaeróbicas, facultativas y aeróbicas (Metcalf & Eddy, 1991).

Lagunas anaeróbicas: Son usadas para el tratamiento de aguas residuales con alto contenido de materia orgánica y con alto contenido de sólidos. Estas lagunas son anaerobias en toda su profundidad, excepto por una capa superficial extremadamente pequeña. La estabilización se da por una combinación de precipitación y la conversión anaerobia de los desechos orgánicos a CO₂, CH₄, otros productos gaseosos, ácidos orgánicos y tejidos celulares.

Lagunas facultativas: En una laguna facultativa existen tres zonas: (1) una zona superficial donde las bacterias y algas existen en una relación simbiótica; (2) una zona anaeróbica en el fondo donde los sólidos acumulados son descompuestos por bacterias anaerobias; y (3) una zona intermedia que es parcialmente aeróbica y parcialmente anaerobia, en la cual la descomposición de los desechos orgánicos se lleva a cabo por bacterias facultativas.

Lagunas aeróbicas: Una laguna aerobia contiene bacterias y algas en suspensión, y las condiciones aerobias prevalecen en toda la profundidad de la laguna. El oxígeno es suplido por la reaeración natural superficial y por la fotosíntesis de las algas. El oxígeno desprendido por las algas en el proceso de fotosíntesis es usado por las bacterias en la degradación aeróbica de la materia orgánica. Los nutrientes y el dióxido de carbono desprendido en la degradación son usados por las algas. En una laguna aerobia las bacterias y las algas existen en una relación simbiótica o de beneficio mutuo.

4.2 Humedales construídos

Los humedales construidos son los sistemas hechos por el hombre equivalentes a los humedales naturales y son diseñados para reproducir y maximizar el tratamiento de las aguas residuales que ocurre en los humedales naturales (Mara, 2010).

El uso de plantas acuáticas ofrece una alternativa para eliminar nutrientes dado que las plantas toman estos elementos del agua residual. Al mismo tiempo las plantas acuáticas proveen oxígeno que es usado por los microorganismos descomponedores.

En los sistemas de tratamiento basados en macrófitas, estas plantas acuáticas tienen una función determinante en la depuración del agua residual. La mayoría de los sistemas de tratamiento a base de

macrófitas consisten en una o más lagunas pocas profundas en las cuales se siembran una o más especies de macrófitas acuáticas.

Los sistemas de humedales construidos caen dentro de dos categorías generales: Sistemas de flujo subsuperficial (Figura 1) y sistemas de flujo superficial (Figura 2).

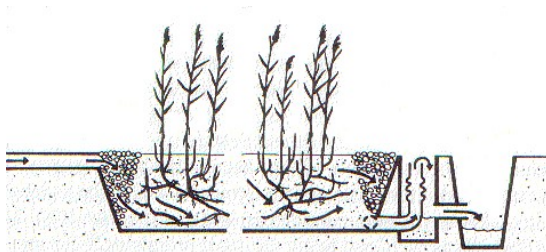


Figura 1. Sistema de tratamiento con macrófitas emergentes y flujo de agua horizontal subsuperficial. (Kadlec&Knight, 1996)

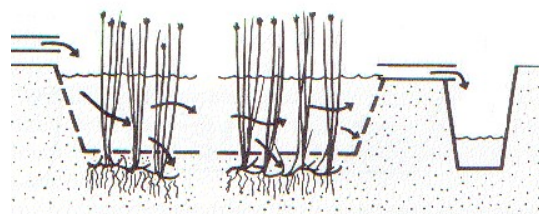


Figura 2. Sistema de tratamiento con macrófitas emergentes y flujo superficial. (Kadlec&Knight, 1996)

Los sistemas de flujo subsuperficial son diseñados para crear un flujo subsuperficial a través de un medio permeable, manteniendo el agua tratada por debajo de la superficie, por tanto, ayuda a evitar el desarrollo de olores y criaderos de mosquitos, así como evitar que el personal a cargo del sistema, entre en contacto directo con el agua en tratamiento. El medio permeable usado (generalmente suelo, arena, grava o roca triturada) afecta grandemente la hidráulica del sistema. Este tipo de sistema es utilizado en Nicaragua desde el año 1996 y son llamados biofiltros.

Los sistemas de flujo superficial son diseñados para simular los humedales naturales, con el agua fluyendo sobre la superficie del suelo a profundidades pequeñas (USEPA, 1993).

Las macrófitas acuáticas usadas en los sistemas de flujo superficial pueden ser emergentes, (Figura 2), flotantes (Figura 3) o sumergidas (Figura 4).

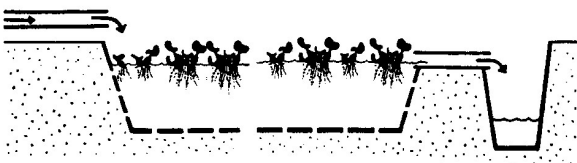


Figura 3. Sistema de tratamiento con macrófitas flotantes. (Kadlec&Knight, 1996)

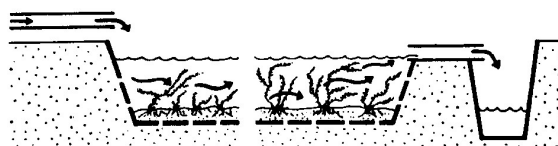


Figura 4. Sistema de tratamiento con macrófitas sumergida. (Kadlec&Knight, 1996)

Los humedales de flujo superficial tienen algunas propiedades en común con las lagunas facultativas sin embargo también tienen muchas diferencias estructurales y funcionales. Los procesos en la columna de agua en las zonas abiertas de un humedal de flujo superficial son casi idénticos a los ocurridos en zonas abiertas en las lagunas. Una zona superficial autotrófica dominada por algas plantónicas o filamentosas o por macrófitas flotantes o sumergidas, limita la luz en las zonas profundas. La ausencia de la luz en las zonas más profundas en ambos sistemas hace que dominen procesos microbiales anaerobios. Sin embargo, las zonas pocas profundas con macrófitas emergentes presente en los humedales de flujo superficial operan de una forma diferente que cualquier zona dentro de una laguna facultativa. Las plantas emergentes tienden a enfriar y dar sombra a la superficie del agua, por tanto, estas reducen el crecimiento de las algas y limitan el proceso de reaeración.

La producción neta de carbono en los humedales con plantas emergentes tiende a ser alta en comparación a las lagunas facultativas debido a la mayor producción de carbono de las plantas (Gearheart, 1999).

4.3 La teoría de la caja negra para el análisis de sistemas.

En el modelo de la caja negra un sistema es analizado únicamente basándose en sus características y relaciones externas. Por tanto, la estructura interna del sistema es tratada como desconocida. A menudo este es el caso, por ejemplo, cuando estudiamos la inteligencia humana.

En el caso de los humedales, mucho de los procesos que ocurren en estos sistemas son conocidos, pero la mayoría de estos procesos no pueden ser medidos o calculados simultáneamente con la precisión suficiente para probar un modelo matemático detallado. De igual forma, generalmente se carece de los recursos necesarios para llevar a cabo todas las mediciones requeridas, en escalas de tiempo apropiadas. Por tanto, en el modelo de la caja negra este tipo de información más o menos vaga, es ignorada. Algunos

ejemplos son: el grado al cual las plantas introducen oxígeno en los sedimentos, detalles sobre el complejo ciclo del nitrógeno, concentraciones y caracterización de algunos microorganismos, etc.

En esta sección se considera un humedal como una caja negra de la cual se desconoce su funcionamiento interno (Figura 5). Aunque se conocen muchos de los procesos químicos, físicos y biológicos que ocurren dentro de un humedal, estos no pueden ser medidos o considerados.

Por tanto, el modelo de la caja negra ofrece una gran simplificación y la pregunta ahora es cuál es su uso.

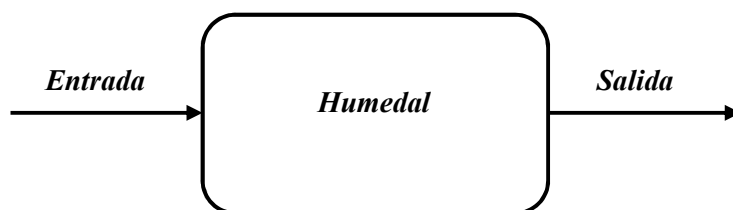


Figura 5. El modelo de la caja negra. (Fuente: Elaboración propia)

Usando esta teoría, un humedal puede ser analizado basado únicamente en los datos de entrada y salida sin tomar en cuenta los procesos internos.

Desde el punto de vista de tiempo y costos, este modelo hace una investigación más factible, especialmente al nivel tecnológico de la ingeniería. El investigar los procesos internos implica llevar a cabo experimentos específicos para investigar aspectos de los humedales los cuales pueden ser divididos en muchos componentes independientes para ser analizados y medidos separadamente. Este tipo de trabajo podría ser interesante, pero es más apropiado para disciplinas más científicas tales como química o microbiología acuática.

El análisis de los datos de entrada y salida es llevado a cabo mediante métodos estadísticos. El resultado de un análisis estadístico es una descripción de la relación entre estos dos conjuntos de datos. Esta relación puede ser usada para establecer conclusiones sobre la operación del sistema, para probar y discriminar entre diferentes modelos.

El principal uso del modelo de la caja negra en un nivel práctico es comparar sistemas con diferentes propiedades internas. Esto podría verse como una desviación de la idea estricta del modelo. La idea es

construir y comparar sistemas con una sola diferencia importante y comparar sus funcionamientos sin suposiciones sobre los efectos o funcionamiento de las diferentes estructuras. Las estructuras de las lagunas y humedales que pueden ser investigadas en esta forma son la profundidad, patrones de flujos, tiempos de retención, tipos de plantas, concentraciones de las sustancias, entre otros.

4.3.1 El modelo de la caja negra aplicado a condiciones hidráulicas.

Las mediciones de flujo son esenciales para entender los procesos ambientales en cualquier investigación de un área determinada. Raramente se puede obtener un buen balance de agua, verificado con mediciones de campo, pero este formaría la base más sólida sobre la cual analizar cualquier situación.

Muchos sistemas no tienen sus influentes monitoreados, solamente unos pocos sistemas tienen mediciones de caudales. Esto es muy usual porque generalmente el objetivo de un tratamiento de aguas residuales está relacionado con las concentraciones del efluente y, por tanto, es aquí donde se centran los esfuerzos. Generalmente, los caudales no son medidos porque esto no es requerido por ningún tipo de regulación. Sin embargo, sin estos parámetros no es posible determinar las cargas en un sistema y relacionarlas con su funcionamiento de manera que se puedan diseñar mejores sistemas (Cooper, 1996).

Una consecuencia de esta situación es que los datos obtenidos de sistemas de lagunas convencionales y lagunas con macrófitas generalmente no son de suficiente calidad para avanzar en el desarrollo de los principios de ingeniería sobre los que están basados estos sistemas. Estos avances deben ser realizados por investigaciones planeadas y organizadas en forma separada.

Monitoreo del influente

Monitoreando el caudal influente de un sistema (el cual es el efluente del sistema de alcantarillado), se obtiene información sobre la cantidad de agua potable abastecida y el agua residual generada en el área, así como una interrelación entre el sistema de alcantarillado con el agua subterránea y el caudal infiltrado en el alcantarillado proveniente de la lluvia. Además, estos datos son de utilidad para conocer las actividades de la población relacionadas con el consumo de agua potable porque las fluctuaciones del efluente del sistema de alcantarillado reflejan estas condiciones. Esta información es de interés para

predecir el comportamiento de la población en nuevas áreas servidas y para el diseño de sistemas de alcantarillados y sistemas de tratamiento de aguas residuales.

Monitoreo del efluente.

Los datos del efluente son necesarios para realizar un balance de agua completo, y como consecuencia para el balance de todos los compuestos químicos. También estos caudales son esenciales para calcular la cantidad total de sustancias descargadas por una planta de tratamiento, lo cual es de utilidad para cuantificar los efectos ambientales en el cuerpo de agua que recibe la descarga.

4.3.2 El modelo de la caja negra aplicada a las concentraciones de las sustancias.

La teoría de la caja negra aplicada a las concentraciones de las sustancias consiste en monitorear los contaminantes en la entrada y en la salida de un humedal para estimar la calidad del agua que se está tratando y determinar el funcionamiento del sistema. Los datos en la entrada y en la salida del sistema pueden ser estudiados en forma separada como un primer paso para obtener una idea estadística y para explorar las razones de la variabilidad en los datos. Sin embargo, con este tipo de estudio no es posible obtener mucha información sobre el funcionamiento del sistema. Esto solo será posible si los datos de la entrada y la salida son estudiados juntos. De esta forma se podrá hacer un análisis más profundo dado que juntos contienen mucha más información sobre el funcionamiento y la eficiencia del sistema.

Monitoreo de las concentraciones en el influente

Los datos sobre el influente de una planta de tratamiento contienen información sobre el sistema de alcantarillado, la cantidad de agua residual cruda y la cantidad de contaminantes entrando al sistema. Sin embargo, estudiar únicamente las concentraciones en el influente no permite establecer conclusiones sobre el funcionamiento del sistema.

Monitoreo de las concentraciones en efluente

Monitoreando únicamente las concentraciones en el efluente de un sistema es de utilidad para comparar las concentraciones de la salida con las normas permitidas para descarga en cuerpos receptores. Como una obligación legal, ENACAL lleva a cabo un programa mínimo de monitoreo en los efluentes de los sistemas de lagunas de estabilización existentes en Nicaragua. ENACAL es responsable del tratamiento de las aguas residuales para controlar la descarga en los cuerpos receptores y del manejo de la calidad de las aguas superficiales. Sin embargo, este nivel mínimo de monitoreo no permite un análisis más profundo sobre la eficiencia de las lagunas.

Los programas de monitoreo llevados a cabo por las compañías de agua son de utilidad para juzgar la influencia de las descargas de plantas de tratamiento en los cuerpos de agua.

Los análisis de los datos del efluente para diferentes sistemas pueden ser de utilidad para estudiar y comparar las razones de la variabilidad en los datos entres sistemas.

Monitoreo de las concentraciones en el influente y efluente.

Un mejor análisis sobre el desempeño de un humedal se obtiene considerando las concentraciones del influente y del efluente, ilustrado en la Figura 6. Con este tipo de análisis se define la eficiencia del sistema y sus propiedades pueden ser investigadas comparando las concentraciones en el influente y efluente. Con los datos de las concentraciones en el influente y efluente es posible estimar el desempeño de un sistema calculando la eficiencia de remoción para cada elemento de interés. Esta eficiencia expresada como porcentaje, representa la capacidad del sistema para reducir las concentraciones de los contaminantes.

Este tipo de análisis basado únicamente en las concentraciones del influente y efluente no toma en consideración las condiciones hidráulicas del sistema. Por esta razón, si se requiere un análisis más exacto, es necesario cuantificar los elementos hidráulicos y entonces la eficiencia del sistema puede basarse en el concepto de cargas.

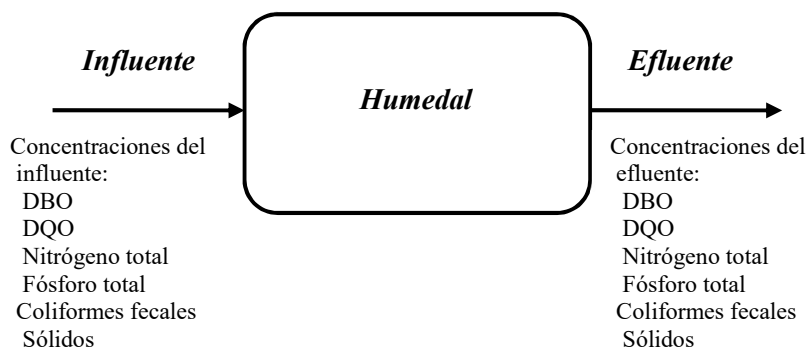


Figura 6. El modelo de la caja negra aplicada a las concentraciones de las sustancias.
(Fuente: Elaboración propia)

*Monitoreando las concentraciones en el influente y efluente es posible hacer un análisis más profundo dado que se puede estimar la eficiencia de un sistema basado en la remoción de concentraciones. Si también se realiza el monitoreo de caudales se podrán establecer conclusiones más exactas como se presenta en la **sección 5.3.3**.*

4.3.3 El modelo de la caja negra aplicada a las cargas.

Usando las mediciones del caudal influente y efluente, así como las concentraciones en la entrada y salida, es posible calcular las cargas aplicadas de cada elemento y la eficiencia de remoción de cargas.

Estimando y monitoreando las cargas en el influente.

Las estimaciones del caudal influente y de las cargas en la entrada son parámetros esenciales para el diseño de una planta de tratamiento. Son de utilidad si se planea construir un sistema de tratamiento para una red de alcantarillado existente, así como si se planea construir un nuevo sistema de alcantarillado para un barrio existente o se planea urbanizar un área nueva.

Basados en datos de concentraciones de DBO_5 en la entrada y en datos del caudal influente, se puede determinar la carga orgánica aplicada a un humedal y se puede estimar si este trabajará bajo condiciones anaeróbicas, facultativas o aeróbicas. En una primera aproximación el grado de tratamiento de una laguna puede medirse en términos de las cargas de DBO_5 .

Además, los datos de las cargas en la entrada proveen información útil para controlar el funcionamiento de la laguna. Por ejemplo, una laguna con la planta flotante Lemna funciona eficientemente bajo cargas

menores que 100KgDBO₅/ha/día (Kadlec and Knight, 2009). Por tanto, monitoreando la carga de DBO₅ en la entrada se controla el funcionamiento de dicha planta acuática.

Monitoreo de las cargas en la salida

Las cargas en la salida de una planta de tratamiento son usadas para estimar la cantidad de contaminantes que están siendo descargados en el cuerpo receptor.

Las cargas en la entrada y salida calculadas para cada contaminante pueden ser usadas para determinar la eficiencia del sistema, en este caso se toman en cuenta las condiciones hidráulicas y se obtiene una mejor visión sobre el funcionamiento del sistema en comparación a la eficiencia calculada únicamente en base a concentraciones. Además, a partir de las cargas en el influente y efluente, se puede calcular un balance de masa para cada elemento, sin embargo, para muchos componentes se debe determinar la cantidad almacenada en los sedimentos para poder realizar el balance. Esto hace muy difícil realizar un balance de masa confiable además de ser caro determinar todos estos elementos.

4.4 Análisis de datos de humedales desde diferentes puntos de vista basados en la teoría de la caja negra.

Un humedal construido para el tratamiento de aguas residuales tiene que cumplir con muchas funciones. Cada una de estas funciones tienen un grado de importancia de acuerdo con los diferentes usos e investigadores del sistema. Por esta razón, la eficiencia de un sistema puede ser analizada desde diferentes puntos de vista dependiendo cual es el objetivo del estudio y que información se quiere obtener y transmitir.

Las decisiones sobre que parámetros medir y con qué frecuencia, están por supuesto determinadas en parte por los medios disponibles. Un segundo aspecto es, sin embargo, las leyes económicas sobre las investigaciones. Por un lado, la economía de hacer la menor cantidad de mediciones como sea posible, y por otro lado el problema de cómo obtener la máxima cantidad de conclusiones (definidas de acuerdo con los criterios de cada investigador) a partir de una mínima cantidad de datos (requeridos para establecer cada conclusión).

La eficiencia de un humedal puede ser estudiada a diferentes niveles, desde los análisis más simples hasta los estudios más complejos y profundos.

En la Tabla 1 se presenta una relación entre diferentes tipos de análisis que pueden ser hechos basados en variados puntos de vista según el investigador y sus conocimientos y la información requerida para llevar a cabo cada estudio. Los análisis están listados desde los más simples a los más complejos.

Tabla 1. Diferentes niveles de análisis para un sistema de humedales.
Relación entre los intereses del investigador y los recursos necesarios para llevar a cabo cada análisis.

Investigador		Interés / Objetivo	Información requerida
Reportes	Compañías de agua	Cumplir los requerimientos legales sobre las descargas a cuerpos receptores para controlar los límites permitidos.	Concentraciones en el efluente
		Cuantificar el caudal de agua residual generado en un área para futuros diseños de sistemas de tratamiento.	Mediciones y variaciones del influente.
Monitoreo	Instituciones Ambientales	Proteger los recursos naturales de descargas de sistemas de tratamiento de aguas residuales.	Concentraciones del efluente o cargas en la salida del sistema para mejores conclusiones.
		Proteger a las personas que viven cerca del sistema de condiciones de insalubridad.	
Investigación	Estudiantes	Ganar conocimientos, experiencia y juicio.	Depende de un interés específico.
	Ingenieros	Mejorar reglas de diseño	Eficiencia del sistema
Enseñanza	Científicos	Establecer nuevas conclusiones	La mayor cantidad de parámetros posibles

La forma más simple de analizar un humedal es usando el modelo de la caja negra en una forma extrema. Basados en esta teoría, un sistema es analizado únicamente en base a los datos de entrada y salida y los mecanismos internos no son de interés.

Otra forma de analizar un sistema es basada en el "modelo de la caja verde" como llama Breen al modelo que toma en consideración aspectos de funcionamiento interno de un humedal. Sin embargo, este modelo ha sido criticado porque falla en identificar y delimitar cuáles son los mecanismos y los componentes importantes para determinar el nivel de funcionamiento de un humedal construido (Breen, 1990).

Una forma compleja de análisis, pero cierta es el modelo del balance de masas. En este caso se pueden diseñar experimentos para investigar aspectos particulares de los humedales y sistemas de tratamiento, por ejemplo, la hidrología del sistema, caracterización de substratos y mecanismos de remoción de nutrientes (Breen, 1990). En el modelo del balance de masas, el análisis del sistema está dividido en diversos componentes que son analizados independientemente. Esto implica mucho trabajo y altos costos y en algunos casos los recursos no están disponibles.

En cierto momento durante una investigación es práctico introducir algunos conocimientos sobre la estructura interna del sistema. Cuando se hace esto, hablamos de una aplicación del modelo de la caja negra siempre y cuando no se cambie la naturaleza básica de este modelo.

4.4.1 Ejemplos de análisis de las eficiencias de humedales desde diferentes puntos de vista.

En esta sección se extiende y explica lo establecido anteriormente sobre el análisis de las eficiencias de humedales desde diferentes puntos de vista. Se presenta la estructura de algunas formas de investigación sobre humedales de manera que se muestra como el interés del investigador determina que datos obtener, como son analizados tales datos y de que manera se presentan las conclusiones en cada caso.

El sistema mostrado en la Figura 7 representa un sistema de tratamiento compuesto de dos humedales; el humedal 1 como tratamiento primario y el humedal 2 como tratamiento secundario. Este sistema puede ser analizado de diferentes formas de acuerdo con los objetivos y los intereses de la persona que lleva a cabo la investigación.

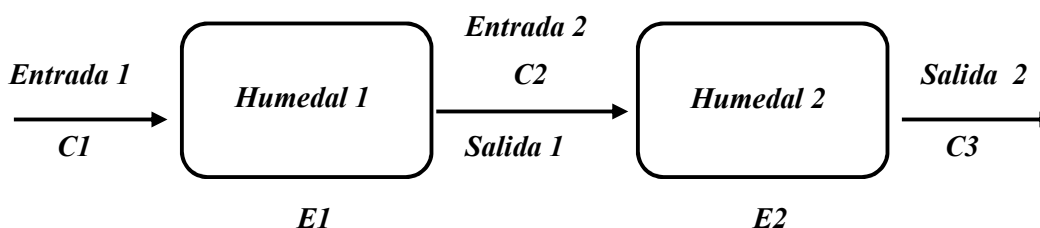


Figura 7. Un sistema de tratamiento compuesto de dos humedales. (Fuente: Elaboración propia)

Los datos de entrada y salida, C1 y C2 representan los datos para el humedal 1 y este humedal genera una eficiencia E1. C2 y C3 son datos para el humedal 2 y generan una eficiencia E2.

Basados en la teoría de la caja negra aplicada a las concentraciones de las sustancias, el análisis del sistema es hecho con los datos de entrada y salida recopilados para el humedal 1 y humedal 2. El análisis de estos datos es hecho dependiendo de que es lo que el investigador quiere conocer. Para un investigador cuyo interés es controlar la descarga del sistema de tratamiento, los dos humedales son analizados como un solo sistema, porque su interés es presentar el grado de remoción de contaminantes para juzgar la eficiencia del proceso en su conjunto. Para este tipo de estudio solo es necesario conocer las características del agua residual cruda y la calidad del efluente total del sistema, es decir los datos de la salida 2; la eficiencia de cada humedal no es de interés. En este contexto el estudio es hecho monitoreando C1 y C3 que representan los datos de entrada y salida del sistema como un conjunto, el esquema se reduce en la Figura 8.

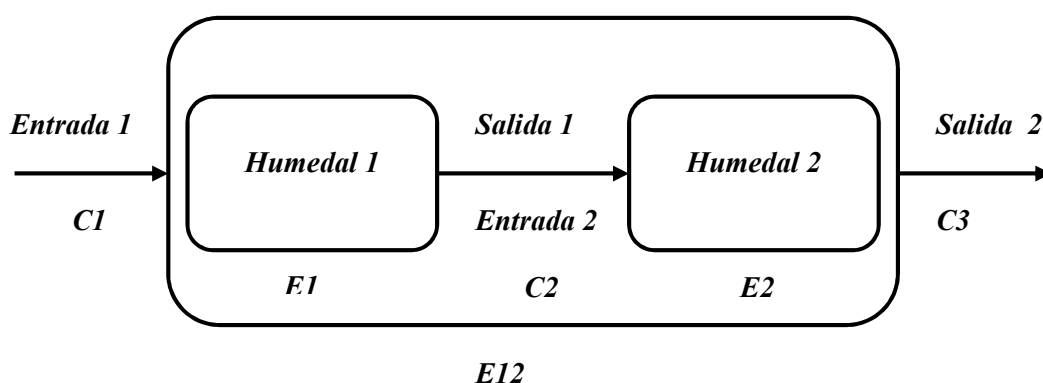


Figura 8. Un sistema de dos humedales analizado como una sola caja negra. (Fuente: Elaboración propia)

Otro tipo de análisis podría ser un estudio comparativo entre dos o más sistemas. El ejemplo de la Figura 9 muestra dos sistemas de tratamientos diferentes y la eficiencia obtenida en cada uno. El análisis

comparativo puede ser hecho desde dos puntos de vista: primero el análisis de la eficiencia de las lagunas relacionado con las variables de entrada y el diseño de cada sistema, segundo, el impacto medioambiental por la cantidad de contaminantes descargados por cada sistema en el cuerpo receptor.

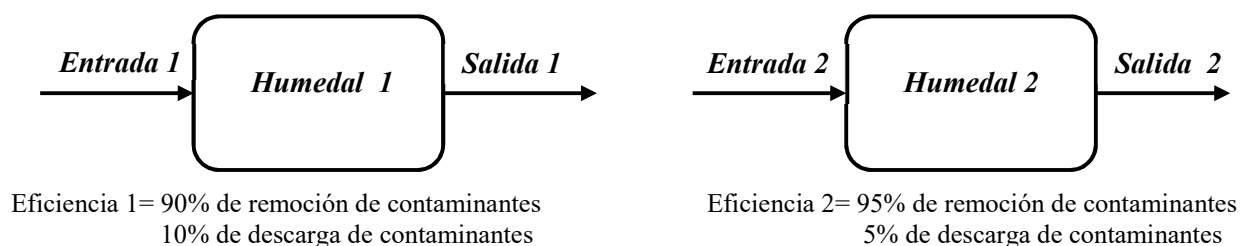


Figura 9. Dos humedales analizados en forma comparativa. (Fuente: Elaboración propia)

El desempeño de dos humedales diferentes es analizado en una forma comparativa dependiendo de cuál es el objetivo de la investigación y que quiere el investigador conocer y transmitir. El análisis puede estar basado en la eficiencia de remoción de cada sistema o en el impacto ambiental que ocasiona cada sistema.

En el primer caso, los resultados de un estudio comparativo pueden contribuir a la ciencia y a mejoras en las reglas de diseño. Analizando la eficiencia de las lagunas, el investigador puede concluir que el humedal 2 tiene un mejor desempeño en comparación al humedal 1 dado que su eficiencia de remoción es más alta, sin embargo, la diferencia entre las dos eficiencias es pequeña. Si el humedal 2 es más caro para construir y operar, el investigador toma la alternativa de construir el humedal 1 dado que no parece haber mucha diferencia entre el desempeño de ambos sistemas. También si el humedal 1 con 90% de eficiencia de remoción, cumple con las normas de descarga, el investigador estará satisfecho con el desempeño de este humedal y no se verá motivado en mejorar la eficiencia de dicho sistema.

En el segundo caso, el análisis basado en el impacto medio ambiental de cada laguna, el investigador puede concluir, a partir de la cantidad de contaminantes que los sistemas están descargando, que el desempeño del humedal 2 es dos veces mejor en comparación al humedal 1; el humedal 1 descarga el doble de contaminantes que descarga el humedal 2. Desde este punto de vista el desempeño del humedal 2 es superior y es la mejor opción para construir.

4.3 Eficiencia basada en concentraciones versus eficiencia basada en cargas.

La eficiencia de remoción de un humedal puede ser estimada y expresada en dos formas: primero, este puede estar basado en la capacidad del sistema para remover concentraciones y segundo, en la capacidad del sistema para remover cargas. Dado que la eficiencia de un sistema puede estimarse desde estos dos puntos de vista, la pregunta que surge es: ¿Cuál de los dos análisis ofrece conclusiones más sólidas?

Comparando concentraciones se puede juzgar cuál de los sistemas cumple mejor con las normas de descarga existentes; estas normas generalmente son expresadas en términos de concentraciones máximas permitidas.

Comparando cargas se puede juzgar cual sistema es mejor desde el punto de vista de protección al cuerpo receptor: después de la mezcla este es el sistema con la menor descarga total de contaminantes. Estos puntos de vista pueden indicar diferentes sistemas como "el mejor". La mayoría de las personas estarían de acuerdo que la protección del ambiente es el objetivo más valioso. Por otro lado, las regulaciones basadas en las concentraciones del efluente son más fáciles de implementar.

Sin embargo, si se requiere un análisis más profundo y el investigador quiere establecer conclusiones más sólidas, el análisis basado en cargas es mejor dado que ofrece una idea más amplia sobre el funcionamiento del sistema. Con este tipo de análisis el investigador puede también controlar las condiciones hidráulicas y hacer un análisis más profundo dado que las cargas dependen tanto de los caudales influentes y efluentes, así como de los procesos meteorológicos que afectan el balance de agua (precipitación, evapotranspiración e infiltración). Especialmente el balance de masa para sustancias conservativas es valioso dado que la ecuación de balance puede ser probada en contra de las mediciones que se realizan. Esta prueba expresa la exactitud de los datos obtenidos y puede por tanto añadir enormemente al poder de convencimiento de los resultados de una investigación. Además, un análisis de los términos residuales o términos de error podría indicar donde es necesario realizar mejoras, ya sea en el sistema o en las técnicas de medición lo cual conllevarán a una mejor calidad de la investigación.

4.4 Ecuación de balance

La ecuación de balance permite cuantificar las cantidades de una sustancia conservativa, como el agua y las sales, que entran a un sistema, salen y los cambios en el almacenamiento en un período específico.

La ecuación de balance se expresa como: $\text{Entrada} - \text{Salida} = \text{Almacenamiento}$ (Figura 10).

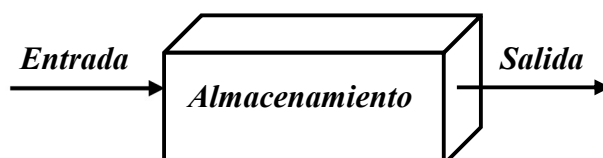


Figura 10. La ecuación de balance. (Fuente: Elaboración propia)

La ecuación de balance permite cuantificar las cantidades de sustancia entrando, saliendo y los cambios en el almacenamiento de dicha sustancia dentro de una unidad. Entrada menos salida representa el almacenamiento.

La ecuación de balance y las sustancias conservativas

Una sustancia conservativa es aquella que no puede ser destruida o creada dentro de un sistema, solo toma parte en el proceso de transporte a través de los límites del sistema y ocurre un almacenamiento variable dentro de la laguna. La ecuación de balance aplicada a las sustancias conservativas es una generalización de la primera ley de Newton (conservación de la masa) y la primera ley de la termodinámica (conservación de la energía).

Algunos ejemplos de sustancias conservativas son el agua, todos los elementos químicos como el Sodio y los iones de Cloruro y muchos grupos químicos como SiO_2 o PO_4 que mantienen su integridad largamente, y no son modificados por las reacciones químicas. Otros compuestos como el azúcar o el ion amonio pueden cambiar rápidamente su concentración por procesos químicos o biológicos, y la ecuación de balance no aplica para estas sustancias. Por otro lado, moléculas como el humus pueden ser lo suficientemente estables para ser consideradas como conservativas sobre un período de tiempo no muy largo: procesos como la producción o el quiebre de cadenas deben ser lentos en relación con la tasa de entrada y salida de estas sustancias.

En un período largo de tiempo el almacenamiento del agua en un humedal puede ser considerado como una constante dado que los cambios en el nivel son insignificantes en comparación a la integral del flujo durante un largo período de tiempo, pero a intervalos cortos las fluctuaciones en el nivel del agua pueden ser tan grandes como el influente, si el efluente es cero durante el intervalo de tiempo considerado. Esta relación es aplicable a químicos que son solubles y no precipitan, evaporan o toman parte en procesos biológicos: Sodio, Potasio, Cloruros y Litio son ejemplos. Estos compuestos pueden ser usados como marcadores para medir factores de dilución y para investigar procesos de mezclado en el agua. Algunas veces esta aplicación puede ser hecha cuando ocurren diferencias naturales en las concentraciones, por ejemplo, la mezcla entre agua fresca y agua de mar, o cuando las sustancias se comportan diferente del agua como en el caso de la evaporación. La cantidad evaporada puede ser estimada a través del incremento de los iones de Sodio dado que el Sodio no toma parte en el proceso de evaporación. Por otro lado, algunos compuestos conservativos, como el fosfato, puede acumularse por largos períodos de tiempo en los sedimentos y otros como el oxígeno pueden expedirse hacia la atmósfera. Se ve que cada grupo de sustancias conservativas tiene su propio grupo de variables en la ecuación de balance.

Una ecuación de balance simple en un período de tiempo tiene dos usos:

1. Si todos los términos, excepto uno, han ido estimados, el último puede ser calculado a partir de la ecuación de balance. Si más de un término es desconocido, se evalúa la suma de ellos.
2. Si todos los términos han sido medidos, la ecuación no cumple perfectamente, pero esta da un término residual. Este residuo contiene información sobre la exactitud de las mediciones. Entre más grande es este término, la calidad de los programas de medición es más baja. Esta inexactitud se puede dividir en dos partes, una sistemática y otra estadística. La parte estadística puede ser investigada por medios estadísticos si se estudian un gran número de intervalos de tiempo y sus correspondientes ecuaciones de balance. Este procedimiento puede dar una idea sobre que mejorar en el programa de medición. Además, este estudio puede ser usado para juzgar que tan confiables son las conclusiones y cuando parar en la interpretación de detalles de un conjunto de datos.

La ecuación de balance y las sustancias no conservativas

Una sustancia no conservativa es aquella que no permanece intacta, y se transforma o degrada relativamente rápido dentro de los límites de un sistema. Ejemplos de sustancias no conservativas son la

demanda bioquímica de oxígeno, amonio (NH_3) y todas las formas químicas del nitrógeno dado que están envueltas en complejos procesos físicos y químicos de transformación dentro de un humedal.

Las diferentes formas químicas de Nitrógeno y el nitrógeno total pueden ser medidos en la entrada y salida de un humedal. Las sales y el nitrógeno orgánico pueden ser convertidos uno en otro por procesos biológicos, por tanto, la ecuación de balance no aplica para los compuestos individuales, pero sí para el nitrógeno total. Sin embargo, una parte significativa de este elemento puede escapar a la atmósfera en forma de amonio, nitrógeno gaseoso y óxido de nitrógeno, mientras que el nitrógeno gaseoso puede fijarse en compuestos orgánicos por microorganismos en la laguna. Estos cambios no son medidos generalmente porque implican investigaciones específicas que son de alto costo para realizar. Consecuentemente, la ecuación de balance para el nitrógeno total generalmente muestra un término residual correspondiente no solo a los errores en las mediciones, sino que también representa los procesos de pérdidas y ganancias del elemento.

En la Figura 11 se resumen algunos de los procesos de transformación en las que las formas no conservativas de nitrógeno toman parte dentro de un humedal.

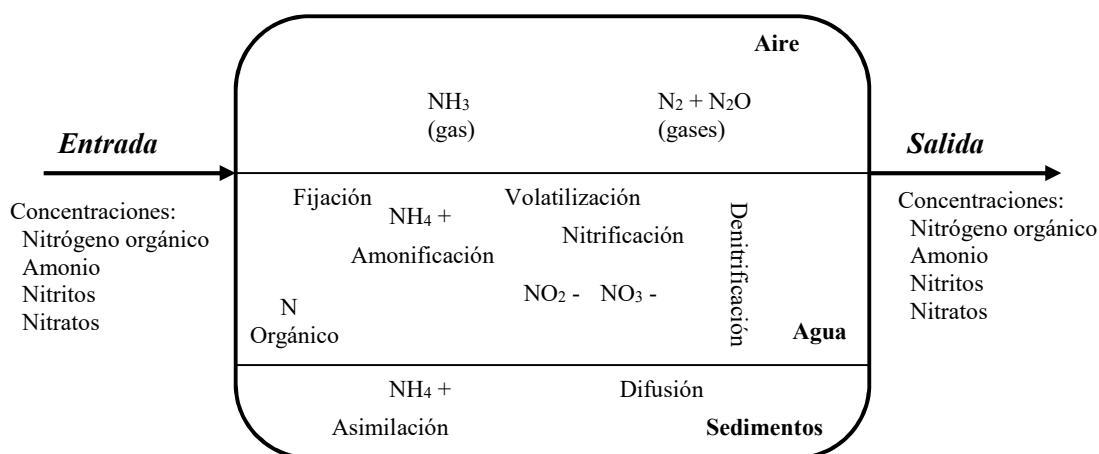


Figura 11. La ecuación de balance para sustancias no conservativas. (Fuente: Elaboración propia)

4.4.1 Ecuación de balance del agua

Cuando la ecuación de balance es aplicada a una masa de agua moviéndose a través de un sistema, esta es llamada ecuación de balance del agua (Boer,1997). En esta sección se considera la ecuación de balance del agua para un humedal.

El balance de agua es la aplicación en hidrología del principio de conservación de la masa. Este establece que, para un volumen arbitrario y durante un período de tiempo, la diferencia entre la entrada total y la salida estará balanceada por el cambio de almacenamiento de agua dentro del volumen.

La parte del influente de la ecuación de balance del agua comprende el flujo entrando al humedal y la precipitación (P) en forma de lluvia. Otros términos entrantes podrían ser la infiltración del agua subterránea y el escurrimiento superficial. La parte saliente de la ecuación incluye el caudal saliendo del humedal, la infiltración (I), la evaporación de la superficie del área a balancear (E) y la transpiración de las plantas (T); estos dos términos juntos forman la evapotranspiración (ET).

Es común usar el término evapotranspiración como la combinación del agua despedida hacia la atmósfera por la evaporación de la lámina de agua y la transpiración de las plantas. Este término generalmente es calculado a partir de datos meteorológicos usando ecuaciones empíricas. Comúnmente se usa la ecuación descrita por Thornthwaite. En esta ecuación, se toman en cuenta la temperatura y la latitud, pero no se considera el tipo de vegetación presente. Dado que las lagunas contienen diferentes tipos de vegetación, es de esperarse que la evapotranspiración sea diferente en cada laguna no solo porque cada tipo de planta tiene una tasa de transpiración diferente sino porque el efecto de cada tipo de vegetación en reducir el efecto de la evaporación también es diferente. Aún cuando las plantas acuáticas reducen la evaporación, en algunos casos la transpiración puede compensar o exceder este efecto.

La transpiración de las plantas de la estación experimental es desconocida.

La forma general de la ecuación de balance del agua es una suma de los datos entrando y saliendo al sistema. El incremento o decremento del almacenamiento es la diferencia entre las partes influentes y efluentes. Dado que todos los componentes del balance de agua están sujetos a errores de medición o de estimación, el balance de agua incluye un término de discrepancia (Δ):

$$\text{Influente} + \text{Lluvia} - \text{Efluente} - \text{Evapotranspiración} - \text{Infiltración} = \text{Almacenamiento} + \Delta$$

Las variables a tomar en consideración en el balance de agua se muestran en la **Figura 12**.

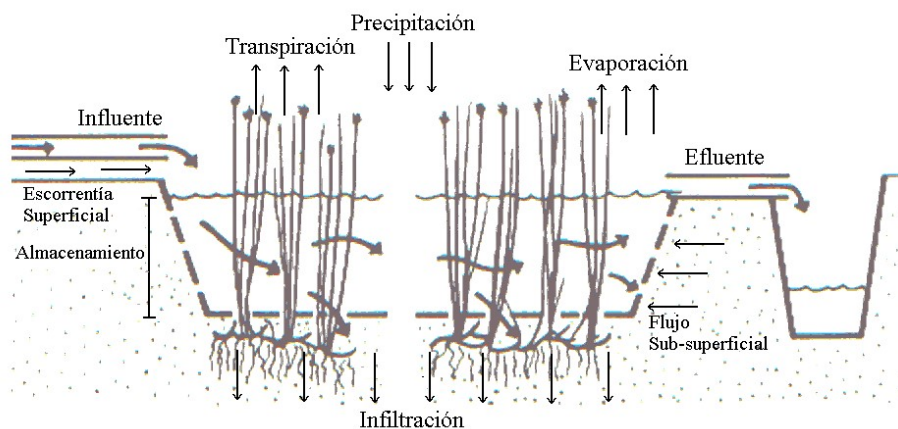


Figura 12. Influentes y efluentes en el balance de agua.

(Adaptada de Kadlec&Knight, 1996)

Para cerrar la ecuación de balance del agua es esencial medir o cuantificar todos los elementos, usando métodos independientes siempre que sea posible. Aún si todos los componentes son medidos o cuantificados por métodos independientes, la ecuación de balance generalmente no balancea y habrá alguna discrepancia. Si la discrepancia después de muchas repeticiones no se aproxima a cero, esto indica un error sistemático en los datos, o tal vez un término en el balance pudo haber sido olvidado. Esto conlleva a una reconsideración en el programa de mediciones. Un error sistemático puede también ser usado como un "término de cierre promedio"; es este caso es usualmente añadido a uno de los flujos del cual se conoce que sus valores no son muy exactos.

Un valor bajo del término de discrepancia en un caso particular podría indicar solamente que sus componentes aleatorios cumplen con el balance en ese caso específico. En un período largo, el valor de la discrepancia debería mostrar un comportamiento aleatorio.

Además, sobre un período largo de integración las variaciones positivas y negativas del almacenamiento tienden a balancear y su valor neto al final de un período largo podría ser asumido como cero. Por tanto, cuando el balance de agua es estimado para largos períodos la ecuación se expresa como:

$$\text{Influyente} + \text{Precipitación} - \text{Efluente} - \text{Evapotranspiración} - \text{Infiltración} = 0$$

Entre más corto es el intervalo de tiempo, se requieren mediciones o cuantificaciones más precisas de los componentes del balance de agua y se requiere una mayor subdivisión de los valores de almacenamiento y de otros elementos: la resolución en el tiempo y en el espacio debe incrementarse. Para investigaciones detalladas se desea una alta resolución, dado que esto permite la separación de los diferentes procesos en el tiempo. Por ejemplo, con cortos períodos de evaluación los parámetros meteorológicos de precipitación y evaporación pueden ser estimados de una mejor manera dado que los cambios que ellos producen el nivel del agua pueden ser observados y medidos con la velocidad que ellos ocurren. Para observar la diferencia entre los datos de la evapotranspiración durante el día y la noche, el balance de agua debe ser lo suficientemente exacto en un período de 24 horas. Para conocer lo que ocurre durante un evento de lluvia el tiempo de resolución debe ser de aproximadamente 10 minutos. Entonces será posible distinguir la lluvia cayendo directamente en la laguna del agua que llega al sistema vía el alcantarillado, por escurrimiento o indirectamente por infiltración en el suelo alrededor de la laguna.

Si es imposible obtener el valor de un componente del balance por mediciones o cuantificaciones directas, dicho componente puede ser evaluado como término residual en la ecuación de balance del agua. En este caso, el término incluye el valor de discrepancia y por tanto contiene un error desconocido, el cual podría ser aún más grande que el valor del componente. Consideraciones similares aplican cuando los valores medidos de un componente son usados para estimar el valor de otro componente. Este valor estimado podría incluir errores debido a las imperfecciones de la fórmula o un error en el componente medido, así el error total es nuevamente desconocido.

Cuando no se tiene la seguridad que el suelo de la laguna es impermeable, podría ocurrir la infiltración, debe asumirse que hay una cantidad de agua perdida a una tasa constante. Tal es el caso de las lagunas de la estación experimental contruidas mediante excavación y conformación del terreno lo que no garantiza la permeabilidad total. Dado que no se tienen mediciones de la infiltración esta variable se

considera como desconocida. Para estimar la infiltración se deben hacer mediciones y modelaciones del agua subterránea.

Efecto del balance del agua en las condiciones hidráulicas de un humedal.

La variabilidad en los flujos de agua residual y los eventos meteorológicos controlan las condiciones hidráulicas de un humedal, lo cual afecta la calidad del agua y la eficiencia de remoción del humedal. La influencia en las condiciones hidráulicas del humedal puede ser descrita de mejor manera observando el incremento y decremento del tiempo de retención hidráulico del humedal causado por las ganancias y las pérdidas en el balance de agua.

La precipitación incrementa el influente, afectando las condiciones hidráulicas reduciendo el tiempo de retención hidráulico, y afectando la calidad del agua diluyendo la concentración de las sustancias. Los eventos de lluvia incrementan la profundidad del agua en una cantidad limitada por la cantidad total del evento de lluvia, pero el incremento actual será menor, dependiendo de la duración del evento de lluvia. Parte del agua de lluvia añadida es perdida dado que se da un incremento del efluente durante el período de la lluvia. La profundidad añadida se disipa de forma lenta. La profundidad extra puede ser observada aún después de varios días que la lluvia paró (Kadlec and Knight, 2009).

La evapotranspiración tiene el efecto de incrementar el tiempo de retención hidráulico y de aumentar la concentración de las sustancias.

Dado que la evapotranspiración está determinada por la radiación solar, existe un fuerte ciclo diurno en la pérdida de agua. El nivel del agua mostrará una caída durante las horas del día.

El efecto de la infiltración es similar a la evapotranspiración, incrementa el tiempo de retención hidráulico e incrementa el potencial de remoción de contaminantes.

4.5 Tiempo de retención hidráulico para sustancias conservativas y no conservativas.

El tiempo de retención hidráulico (TRH) es el tiempo de residencia del flujo y sus componentes dentro de la laguna, siendo el tiempo disponible para remover los contaminantes y estabilizar la materia orgánica. El cálculo es hecho mediante la siguiente ecuación:

$$TRH(días) = \frac{Volumen(m^3)}{Q(\frac{m^3}{día})}$$

De acuerdo a la literatura, el TRH puede ser calculado usando el caudal influente en ausencia de registros del caudal efluente. En otros casos cuando hay datos disponibles del caudal influente y efluente, se calcula un promedio de ambos para estimar el TRH (Kadlec and Knight, 2009).

Sin embargo, el tiempo de residencia de una sustancia dentro de una laguna depende de la naturaleza de dicha sustancia. Como se explicó anteriormente, existen dos tipos de sustancias, conservativas y no conservativas. La naturaleza de la sustancia define su tiempo de residencia y a la vez la forma de calcularlo.

Para un elemento conservativo, la cantidad de sustancia entrando a la laguna será la misma que sale de ésta, dado que este tipo de sustancia no sufre ninguna pérdida de su volumen en su paso a través de la laguna. Para estas sustancias, el tiempo de retención hidráulico es calculado con el efluente. Las sustancias conservativas son usadas para determinar el tiempo de retención real en una laguna monitoreando el tiempo que esta sustancia toma para ir a través de la laguna y salir de ésta.

Para una sustancia no conservativa, dado que esta sufre cambios dentro de la laguna, el TRH es calculado usando el influente.

En este caso del agua, que puede ser afectada dentro de la laguna por procesos como la evaporación o la transpiración de las plantas, esto implica que la cantidad de agua entrando y saliendo de la laguna no será la misma. En estas circunstancias el cálculo es hecho usando el influente el cual determina el tiempo que el agua estará dentro del sistema sin tomar en cuenta las afectaciones internas.

CAPÍTULO V. DISEÑO METODOLÓGICO

En este capítulo se abordará la metodología del presente estudio, los datos a utilizar y los elementos estadísticos de análisis.

Este estudio estará basado principalmente en el análisis de la variabilidad en el desempeño de las lagunas de estabilización de la estación experimental de León. Es una investigación del tipo cuantitativa con datos secundarios generados en el período de investigación de Mayo 1998 a Diciembre 1999.

El análisis y la presentación de un conjunto de datos sobre lagunas y humedales construidos debería transmitir información teniendo un propósito específico en mente (por ejemplo, mostrar una tendencia, ilustrar variaciones estacionales, variaciones entre sistemas o identificar datos atípicos).

El análisis estadístico también es de utilidad para transmitir información sobre un conjunto de datos. Este tipo de estadística transfiere información sobre las variables medidas. Tradicionalmente, la media y la desviación estándar son los elementos estadísticos usados para resumir un conjunto de datos. En las aplicaciones prácticas, sin embargo, la media y la desviación estándar no son siempre los elementos estadísticos más apropiados para resumir un conjunto de datos porque los datos no siempre siguen un patrón de distribución normal alrededor de una media, sino que los datos están frecuentemente desviados en una dirección u otra. Esta desviación ocurre porque hay muchos factores que influyen las mediciones.

Los métodos gráficos tienen la intención de mostrar un conjunto de datos como un todo, permitiéndonos resumir el comportamiento general y estudiar detalles. Una de las funciones más importantes de las gráficas en la ciencia y en la tecnología es mostrar variaciones, porque todas las mediciones varían. Aun cuando son variables controlables y se mantienen constante, las mediciones varían debido a variables incontrolables o errores de medición. Escoger un formato de gráficas que transmita de la mejor manera la información sobre el monitoreo de datos, requiere una decisión cuidadosa. Siempre que el conjunto de datos de un parámetro presente un patrón irregular o incierto, se debe hacer uso de análisis exploratorio

de datos. En esta investigación se hará uso de gráficas de cajas para mostrar la distribución de cada conjunto de dato. Las gráficas de cajas se explican a detalle en el Anexo 3.

Se demostrará que las irregularidades en los datos ocurren casi en todos los aspectos de nuestra investigación.

5.1 Descripción de la estación experimental de León

La estación experimental construida en León está conformada de lagunas primarias cada una de 1.0 Ha y operan en paralelo. El efluente de estas lagunas se junta y se convierte en el influente de las tres lagunas secundarias, A, B y C que juntas representan 2.0Ha y se operan en paralelo.

Las lagunas secundarias A y B están divididas en tres celdas cada una nombradas como A1, A2, A3, B1, B2 y B3. En la celda A1 se sembró Lemna, en las celdas B y A2 se sembró Phragmites Australis y la celda A3 y laguna C se operaron como lagunas facultativas con alga y servirían como testigo. Las celdas A operaban en paralelo y las celdas B operaban en serie.

En la figura 13 se presenta el esquema de distribución de las lagunas y humedales que conforman la estación experimental y los puntos donde se realizaron mediciones de caudal y muestreos de los parámetros de calidad del agua que serán la base de esta investigación.

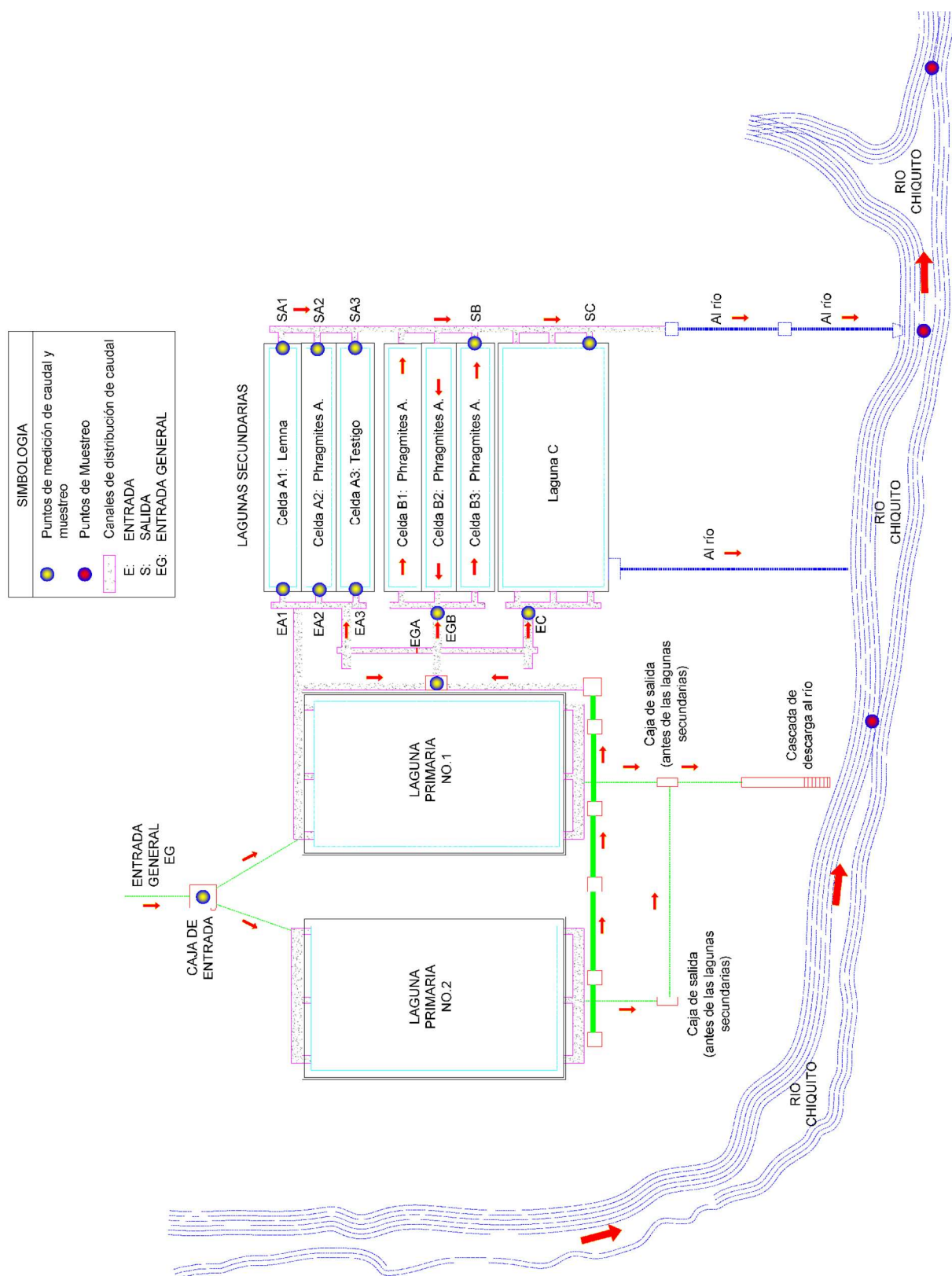


Figura 13. Esquema de las lagunas en la estación experimental de León, puntos de medición de caudal y muestreos de parámetros de calidad del agua. (Adaptado de Baldizón et al., 2000).

5.2 Identificación de los datos a utilizar procedentes de la estación experimental de León

En la figura 13 se mostraron los puntos donde se realizaron mediciones de caudal y toma de muestras en las entradas y salidas de cada laguna. Parte de los datos utilizados en este análisis son los presentados por Baldizón et al (2000) en donde se puede encontrar información más detallada sobre el sistema. Además de las mediciones de caudal y parámetros de calidad del agua, el análisis de esta investigación incluye datos meteorológicos e información sobre las plantas acuáticas usadas en estas lagunas.

La cantidad y la calidad de los datos recopilados del primer programa de investigación en la estación experimental de León en el período de Mayo 1998 a Octubre 1999, permitirán un análisis más completo y será posible establecer mayores conclusiones que las establecidas en estudios donde solo se hizo uso de una parte de los datos generados.

La base de datos para el análisis de caudales y balance de agua está compuesta de 144 registros diarios con lecturas cada 2 horas. Las lecturas de caudal se realizaron en la entrada y salida de cada laguna como se mostró en la figura 13, mediante la medición de la altura de agua sobre un vertedero. Los resultados de mediciones de caudales están expresados en litros por segundo (lps).

Tabla 2. Número de datos para análisis de caudales y balance de agua.

Punto	Cantidad de registros diarios	Observaciones
Lagunas Primarias	43	Lecturas en la entrada y salida
Laguna A1	25	Lecturas en la entrada y salida
Laguna A2	25	Lecturas en la entrada y salida
Laguna A3	25	Lecturas en la entrada y salida
Laguna B	16	Lecturas en la entrada y salida
Laguna C	10	Lecturas en la entrada y salida
Total	144	

Los datos de precipitación y evaporación serán tomados de registros de INETER de la estación meteorológica de León correspondientes al período de la investigación.

El desempeño de los sistemas de lagunas y humedales se valorará en base a la reducción de parámetros contaminantes. Los parámetros por analizar son: DBO₅, DQO, Fósforo Total, Nitrógeno Total Kjeldahl, Nitrógeno Orgánico, Amonio, Sólidos Totales, Sólidos Suspendidos Totales y Coliformes Fecales. Los análisis se realizaron en las diferentes etapas de estudio de la estación experimental y representan muestras en la entrada y salida de cada laguna como se mostró en la figura 13. En la tabla a continuación se muestran la cantidad de datos a utilizar por parámetro y por laguna.

Tabla 3. Cantidad de datos para análisis del desempeño de las lagunas

Punto	DBO ₅	DQO	P	NTK	N orgánico	Amonio	ST	SST	Coliformes Fecales
Lagunas Primarias	47	41	49	40	41	43	46	47	40
Laguna A1	17	15	17	12	20	22	17	17	21
Laguna A2	28	23	28	20	20	20	28	28	21
Laguna A3	46	41	46	38	39	38	45	45	40
Laguna B	36	35	36	34	35	36	35	35	34
Laguna C	27	29	29	27	27	27	28	28	29
Total	201	184	205	171	182	186	199	200	185

5.3 Matriz de operacionalización de variables

En la Tabla 4 se presenta la matriz de operacionalización de las variables a considerar en esta investigación.

A partir de cada objetivo específico se han identificado las variables involucradas y se ha establecido su definición operacional de manera que se pueda comprender de una mejor manera la forma como se analizó cada elemento de la investigación.

Tabla 4. Matriz de operacionalización de variables

Objetivo específico 1	Nombre de la variable	Definición operacional	Indicador	Tipo de Variable	Valor / Escala
Valorar los principales parámetros que influyen en la variabilidad de los caudales y el balance de agua en lagunas de estabilización y humedales construidos.	Lectura inicial de caudal (h)	Se mide mediante una regla graduada en cm sobre el vértice del vertedero de control de flujo a la entrada y salida de cada sistema.	cm de altura de agua registrados por el investigador en una bitácora de datos.	Cuantitativa, continua	Valor: cm de altura de agua. Escala: Rango de 0 – 30cm.
	Caudal calculado	Se estima a partir de la lectura de agua sobre el vertedero de control de flujo en cada sistema, caudal de entrada y caudal de salida.	Fórmula $C = 0.827 h^{2.5}$	Cuantitativa, continua	Valor: litros por segundo (L/s)
	Precipitación	Es la cantidad de agua que cae en una cierta área por unidad de tiempo.	Registros de datos reportados por INETER para la estación meteorológica más cercana al sitio en estudio.	Cuantitativa, continua	Valor: mm de agua acumulados
	Evapotranspiración	Combinación del proceso por el cual el agua pasa de estado líquido a estado gaseoso, transfiriéndose a la atmósfera y el proceso de respiración de las plantas.	Evaporación: Registros de datos reportados por INETER para la estación meteorológica más cercana al sitio en estudio. Transpiración: estudios específicos según el tipo de planta.	Cuantitativa, continua	Valor: mm de agua reducido Valor: ml de agua consumidos por una planta.

	Infiltración	Transferencia de agua desde la superficie hacia las profundidades.	Estudio de infiltración mediante el rebajamiento de un volumen de agua en la unidad de tiempo.	Cuantitativa, continua	Valor: mm de agua rebajada.
	Balance de agua	Establece que para un volumen de agua arbitrario y durante un período de tiempo, la diferencia entre la entrada total y la salida estará balanceada por el cambio de almacenamiento de agua dentro del volumen.	Fórmula $C_e + P - C_s - ET - I = A + \Delta$ Resultado genera valores positivos o negativos.	Cuantitativa, continua	Valor: Metros cúbicos por segundo (m^3/s).

Objetivo específico 2	Nombre de la variable	Definición operacional	Indicador	Tipo de Variable	Valor / Escala
Analizar la variabilidad en el desempeño entre las lagunas y humedales de la estación experimental León basada tanto en las mediciones de concentraciones de contaminantes como en las mediciones de cargas de contaminantes en la entrada y salida de cada tipo de sistema.	Concentraciones	La concentración de una sustancia o contaminante determina la proporción de soluto y solvente en una solución.	Valores generados en análisis de laboratorio para muestras tomadas en las entradas y salidas de cada sistema.	Cuantitativa, continua.	mg/l

	Carga	Representa la masa de contaminante por unidad de tiempo vertida a una corriente de agua.	Fórmula Carga = Caudal * Concentración	Cuantitativa, continua.	kg/día
--	-------	--	---	----------------------------	--------

Objetivo específico 3	Nombre de la variable	Definición operacional	Indicador	Tipo de Variable	Valor / Escala
Estimar la variabilidad en el desempeño de las lagunas convencionales y humedales construidos de la estación experimental de León.	Desempeño de cada sistema	Capacidad de un sistema para reducir los contaminantes presentes en el agua residual.	Fórmula $\frac{\text{Conc}_i - \text{Conc}_f}{\text{Conc}_i} * 100$ $\frac{\text{Carga}_i - \text{Carga}_f}{\text{Carga}_i} * 100$	Cuantitativa, continua.	Valor: Porcentaje (%) Rango 0 – 100%

5.4 Metodología de análisis

Para la determinación del régimen de flujo diario se hará uso de gráficos de correlación para mostrar la tendencia de curvas diarias y el comportamiento del flujo durante las 24 horas. Posteriormente, el uso de gráfico de cajas para el flujo de cada laguna permitirá mostrar el comportamiento de los datos de entrada y salida para una misma laguna y comparar entre sistemas. Otra utilidad de los gráficos de caja es que nos permitirá identificar datos atípicos o valores extremos alejados. La presencia de datos atípicos sugiere una mayor investigación, por ejemplo, eventos de lluvia en esas fechas o situaciones especiales con la medición de caudales, manipulación de vertederos o lecturas incorrectas.

Los resultados de las mediciones de los parámetros de calidad del agua en las entradas y salidas de las lagunas serán analizados usando varias técnicas estadísticas. Primeramente, para cada laguna se hará uso de gráficos de cajas, con los cuales podremos identificar la distribución general de los datos, así como datos extremos o atípicos.

Los datos de mediciones de parámetros de calidad de agua de entradas y salidas de cada sistema permitirán realizar el análisis de la variabilidad basado en concentraciones. Haciendo uso de gráficos de cajas, se analiza la relación Salida/ Entrada de cada parámetro. Dicha relación, expresada en porcentaje, permitirá analizar la variabilidad en las eficiencias de cada sistema.

El análisis de la variabilidad de cada sistema basado en cargas contaminantes se realizará haciendo uso de los flujos obtenidos en el análisis de balance de agua.

Mediante el uso de gráficos de cajas se estudiará el comportamiento de los datos de cargas de contaminantes de cada sistema.

Finalmente, dado que el desempeño de cada sistema puede ser analizado desde los dos puntos de vista expuestos anteriormente, remoción de concentraciones o remoción de cargas contaminantes, se realizará una comparación entre ambos tipos de análisis para las lagunas secundarias y humedales de la estación experimental.

CAPÍTULO VI. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

6.1 Régimenes de caudales y su variabilidad en las lagunas.

El régimen de caudales que entran y salen en las lagunas presentan un patrón diario. El caudal entrante que viene del alcantarillado sanitario muestra el comportamiento de la población: en las primeras horas de la mañana el influente a las lagunas primarias comienza a incrementar rápidamente, a las 7:00 am aproximadamente, alcanzando el máximo entre las 7:00 y las 9:00 am. Después de esta hora el caudal influente decrece lentamente hasta que vuelve a llegar a un mínimo entre las 4:00 am y 6:00 am del día siguiente. La evapotranspiración representa un caudal que sale y también sigue un patrón diario, es alta durante el día y baja durante la noche. La evapotranspiración es significativa, pero es menor que el caudal influente y esto se concluye dado que siempre hay un caudal efluente. En las mañanas el nivel de agua de las lagunas primarias comienza a subir, esto conlleva con el tiempo a tener un mayor flujo en el vertedero de salida de dichas lagunas. El efluente también sigue un patrón diario trasladado en el tiempo en comparación con el influente, su patrón de cambio se reduce por el efecto ecualizador del almacenamiento dentro de la laguna. Este efecto ecualizador y la evapotranspiración reducen el rango de los flujos de salida.

Dado que la salida de las lagunas primarias es la entrada de las lagunas secundarias, el patrón se repite en las lagunas secundarias, las variaciones en el influente de dichas lagunas son similares pero retardadas y amortiguadas en comparación con las lagunas primarias. El mismo razonamiento aplica para el efluente de las lagunas secundarias: la variación es menor y trasladada en el tiempo.

En esta sección se analizan los patrones diarios de los flujos en las lagunas y sus variaciones.

6.1.1 Patrones diarios

Lagunas Primarias

En la Figura 14 se muestran los flujos diarios en la entrada y salida de las lagunas primarias para cuatro días consecutivos medidos en intervalos de 2 horas. El influente es el agua residual que llega del alcantarillado sanitario de la ciudad el cual sirve a 23,000 habitantes aproximadamente. Se observa que

el influente se incrementa a partir de las 6:00 am y 8:00 am cuando las personas se levantan y rápidamente se alcanza el máximo consumo de agua por las actividades domésticas.

Después de alcanzar el máximo, el uso de agua por las personas decrece por lo que el flujo se reduce casi linealmente durante el resto del día hasta que alcanza nuevamente su mínimo a las seis de la mañana del día siguiente.

El efluente presenta un patrón similar, incrementa durante el día y decrece durante la noche. El efluente promedio es menor que el influente debido a la evapotranspiración, su ciclo diario es retardado tanto por el almacenamiento como por la evapotranspiración. El pico se da a las 14:00 horas y la retardación es aproximadamente a las 6:00 horas. Entre las 22:00 horas y las 6:00 horas el influente y efluente es casi el mismo. En ambas curvas los valores máximos y mínimos parecen constantes, las diferencias se dan principalmente en el tiempo.

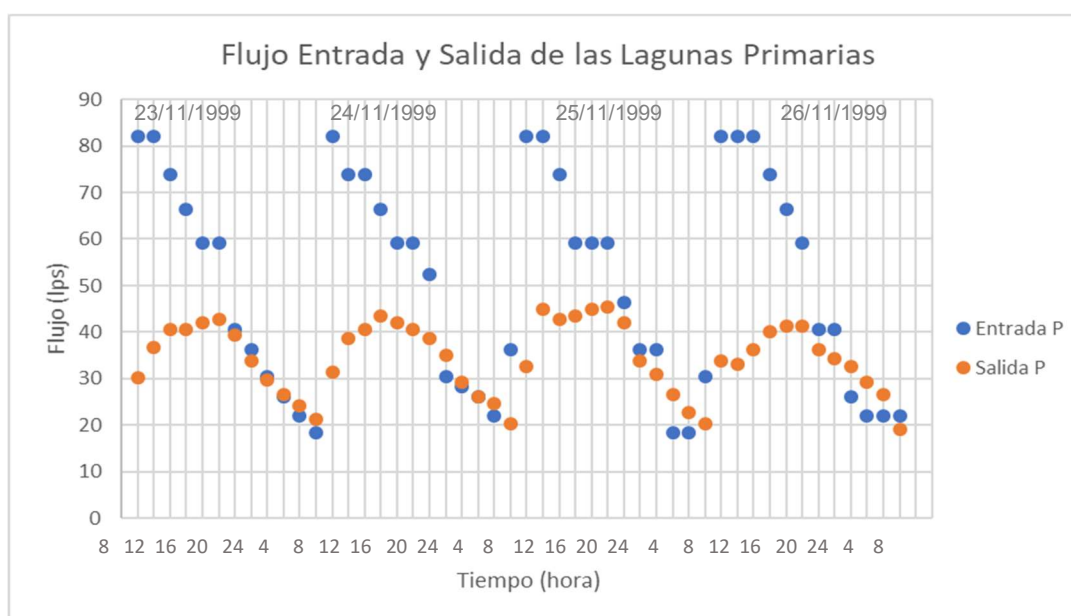


Figura 14. Flujos en las entrada y salida de las lagunas primarias, 23, 24, 25 y 26 de Noviembre de 1999, medidos a intervalos de 2 horas.

El influente es el agua residual que llega del alcantarillado sanitario de la ciudad. El influente se incrementa entre las 6:00 y 8:00 horas y decrece en el resto del día. El efluente promedio es menor que el influente debido a la evapotranspiración, su pico es a las 14:00 horas. Entre las 22:00 y las 6:00 horas los flujos influente y efluente son casi iguales.

Lagunas Secundarias

En la Figura 15 se muestran los flujos de entrada y salida de la laguna secundaria C para los días 23, 24, 25 y 26 de Noviembre de 1999, medidos a intervalos de 2 horas. El influente es parte del efluente de las lagunas primarias. Se ve claramente el comportamiento cíclico y cambios en el tiempo, existe la misma relación entre influente y efluente como en las lagunas primarias; la amplitud de los datos de efluente es menor y trasladados en el tiempo. El máximo influente ocurre entre las 13:00 y 16:00 horas y decrece durante la noche hasta que el ciclo comienza nuevamente la mañana siguiente. El efluente de las lagunas alcanza su pico a las 18:00 horas y el salto en el tiempo entre influente y efluente es de 2 horas aproximadamente. La variación diaria en las otras lagunas secundarias (A y B) es similar.

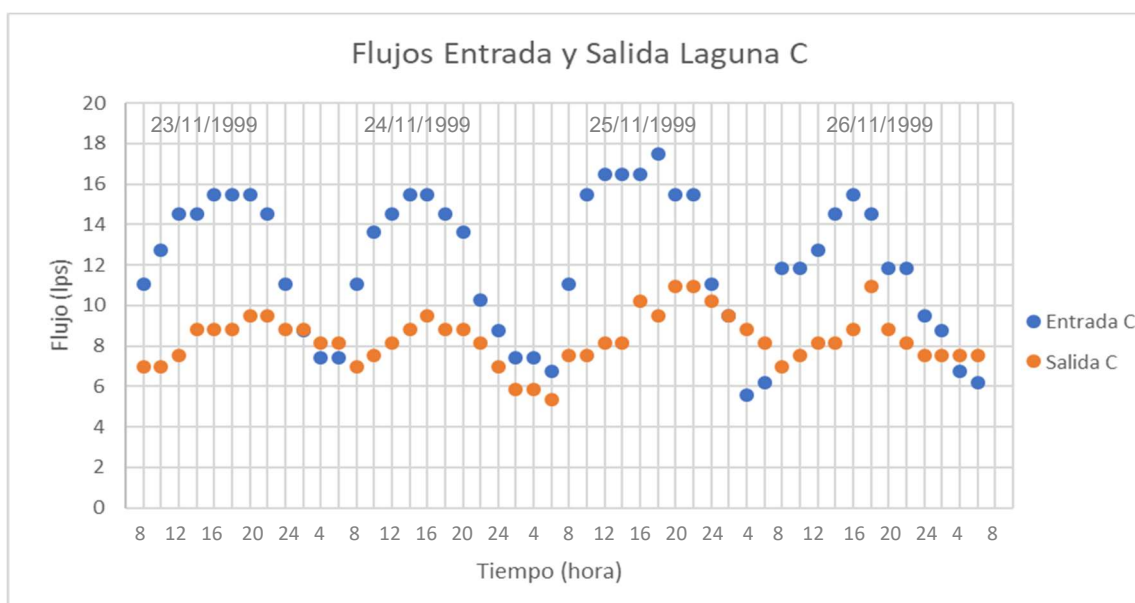


Figura 15. Flujos de entrada y salida de las lagunas secundarias C para los días 23, 24 y 25 de noviembre de 1999, medidos a intervalos de 2 horas.

El comportamiento cíclico se aprecia claramente: la misma relación entre influente y efluente como se mostró en las lagunas primarias.

A continuación se hace uso de gráficos de cajas para representar el comportamiento de los caudales de entrada y salida de las lagunas primarias que es a su vez la entrada de las lagunas secundarias. El conjunto de datos consiste en 43 mediciones diarias realizadas a intervalos de 2 horas entre Agosto 1998 y Noviembre 1999.

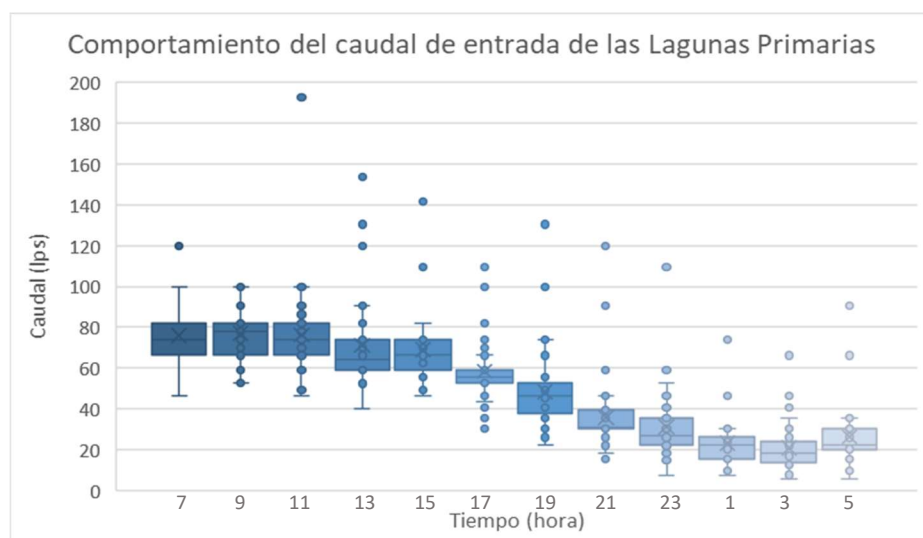


Figura 16. Gráfico de cajas de los flujos de entrada a las lagunas primarias. El flujo máximo ocurre entre las siete y nueve de la mañana.

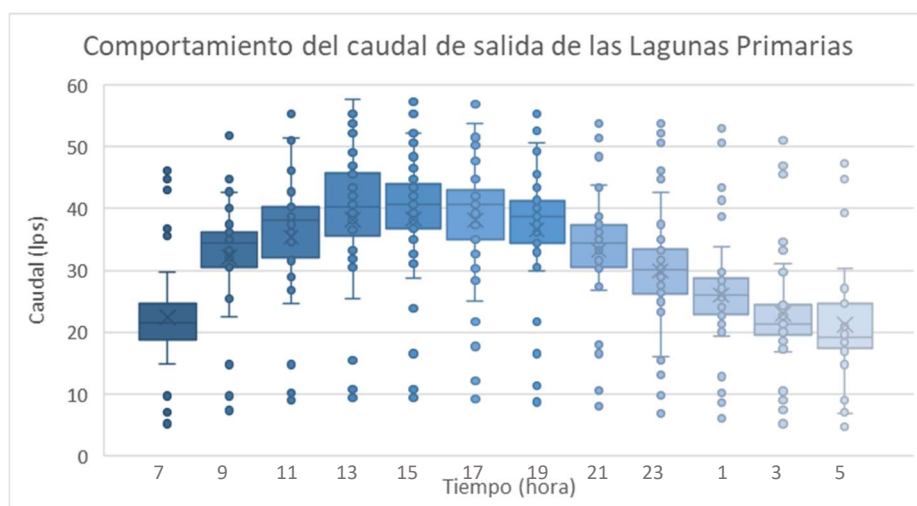


Figura 17. Flujos a la salida de las lagunas primarias. El flujo máximo ocurre entre las 13:00 y 15:00 horas, aproximadamente 6 horas después del influente máximo. La mayoría de valores atípicos corresponden a un periodo de 6 días (Junio 31, Agosto 13, Agosto 28 y Septiembre 10 de 1998, Marzo 26 y Abril 9 de 1999), en estas fechas se dieron trabajos de mantenimiento y aproximadamente la mitad del flujo de salida de las lagunas primarias se desvió directamente al río Chiquito a través de un bypass de salida. Para las lagunas secundarias no representa problema porque el flujo que entró a estas lagunas si fue medido. Los valores atípicos en los datos de flujo alto podrían corresponder a periodos de lluvia; ocurren a cualquier hora del día, indicando que la contribución de agua de lluvia al alcantarillado sanitario es significativa, incrementado además por la lluvia cayendo en las lagunas y quizás escorrentía.

Es remarcable que en la gráfica de los caudales de entrada únicamente se presentan datos atípicos que indican que ocurrió un flujo alto. Esto podría representar la ocurrencia de lluvia y el aumento del flujo normal de agua residual debido a la existencia de conexiones ilegales de agua de lluvia al alcantarillado sanitario. En la gráfica del caudal de salida se presentan datos atípicos en ambos extremos. Este hecho será analizado posteriormente.

Utilizando datos de mediciones durante días jueves entre Agosto 13, 1998 y Julio 15, 1999, se analiza el comportamiento de los caudales a la entrada y salida de las lagunas secundarias A1, A2, A3, B y C. En el Anexo 3 se presentan los gráficos de caja con mediciones a intervalos de 2 horas. En la figura 18 se muestra el comportamiento típico de los flujos de las lagunas secundarias utilizando los datos de la Laguna A1.

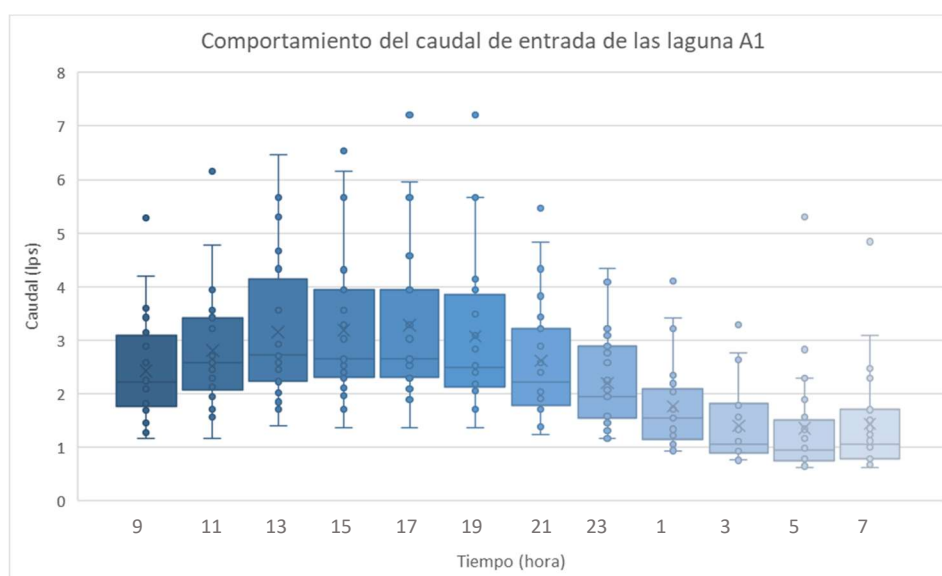


Figura 18. Gráficos de caja de los influentes de la laguna secundaria A1. Los datos son de 25 curvas diarias con mediciones a intervalos de 2 horas. Basados en la mediana el máximo flujo ocurre a las 13:00 aproximadamente. La mayoría de los valores atípicos corresponden a días de lluvia (septiembre 25, Agosto 13, 1998 y Abril 30, 1999).

Se puede identificar que el influente de las lagunas secundarias contiene menos valores atípicos que los efluentes de las lagunas primarias. Sin embargo, se aprecia que todo el conjunto de datos está desviado hacia los valores altos y los valores atípicos se dan en el rango alto. Los valores menores que la mediana son menos variables, ellos están agrupados bien cercanos, mientras que los valores mayores que la mediana son variables. Por esta gran variabilidad de los valores altos, no es posible determinar

exactamente cuando ocurre el flujo máximo. Por esta razón, el análisis se basará en la mediana de cada conjunto de datos.

De la Figura 19, se puede apreciar que los efluentes son casi constantes en un ciclo de 24 horas. Los datos valores atípicos en estas gráficas corresponden a las mismas fechas, principalmente Agosto 13, Septiembre 25, Octubre 23 de 1998 , Abril 8 y 30 de 1999. En Abril 8 los flujos fueron mayores porque las compuertas de las lagunas primarias fueron abiertas y las lagunas secundarias recibieron más caudal. En las otras fechas el incremento de caudal se debió a lluvia. Los valores del rango alto del conjunto de datos están definidos por los valores de flujo durante los períodos de lluvia. Aun cuando estos valores no se muestran como valores atípicos, ellos son los causantes de la variabilidad en el rango superior.

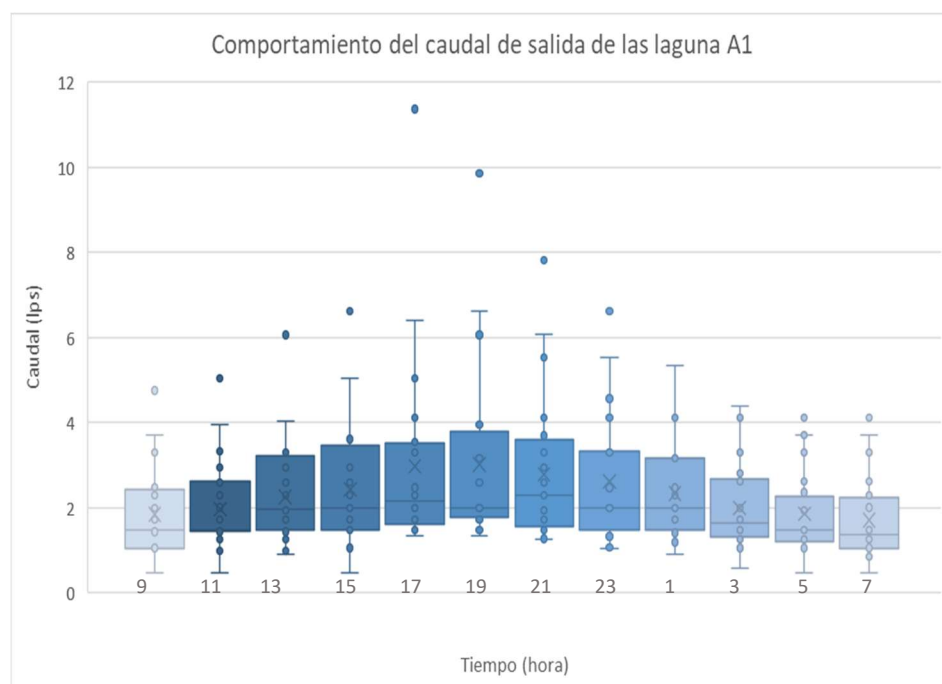


Figura 19. Gráfico de cajas de los efluentes de la laguna A1. El flujo máximo se da a las 17:00 horas. Los valores atípicos corresponden a días de lluvia (Septiembre 25, Agosto 13, 1998 y Abril 30, 1999).

En base a las gráficas presentadas en el Anexo 4, la laguna B presenta un comportamiento diferente en comparación con las otras lagunas secundarias. El influente es menos variable que el efluente. El influente presenta valores atípicos en ambos rangos (alto y bajo), pero principalmente en el rango alto. Los datos

de efluente son más variables. La desviación o sesgo de los datos es variable en los conjuntos, sin embargo, los elementos bigotes de los extremos superiores son más altos que los de los extremos inferiores.

Para la laguna C la variabilidad es menor en comparación con las otras lagunas, especialmente durante la noche la variabilidad de los datos es notablemente más baja. El influente presenta valores atípicos en el rango alto debido a lluvias registradas en Abril 29. El efluente presenta valores atípicos en ambos rangos. Los del rango alto se dieron a causa de lluvias (Julio 1 y Junio 16, 1999), los valores atípicos del rango bajo se dieron a causa de un movimiento accidental del vertedero de salida.

De manera general se observaron diferencias en las curvas diarias de cada laguna. El comportamiento de las lagunas A1, A2 y A3 es similar. El influente de estas lagunas presenta más variabilidad que el efluente. La amplitud diaria de los efluentes de estas lagunas es bajo y tiende a permanecer constante.

Para la laguna B el influente presenta menos variabilidad que el efluente. Para la laguna C el comportamiento es diferente del resto de las lagunas. La amplitud diaria de los datos de influente y efluente es más notoria. El influente presenta más variabilidad entre las 9:00 y las 17:00 horas. Después de esa hora la variabilidad del influente se reduce. El efluente de la laguna C es más variable entre las 17:00 y las 5:00 horas.

6.1.2 Efecto de la lluvia en los flujos de las lagunas

Los valores atípicos encontrados en las figuras 18 y 19 son analizados de forma separada para confirmar si estos representan eventos de lluvia. En la Tabla 5 y 6 se muestran los datos de las fechas que se dieron los valores atípicos y la cantidad de lluvia registrada en esas fechas. Con dichos datos se confirma que hubo lluvia en la mayoría de las fechas cuando los valores atípicos del rango alto ocurrieron, excepto por dos días, Agosto 12 y Noviembre 25, 1999, cuando por razones desconocidas los flujos fueron más altos de lo normal. Se observa que la mayoría de los valores atípicos encontrados en los datos de influente recurren en los datos de efluente, con algunas pocas excepciones. Por ejemplo, las tres fechas de 1998 no se muestran como valores atípicos en el efluente porque esos días el efluente de las lagunas primarias fue más bajo de lo normal por las razones explicadas en la figura 17.

Tabla 5. Valores atípicos en el influente de las lagunas primarias

Fecha	Precipitación mm/día	Valores atípicos en el influente (L/s)											
		9:00	11:00	13:00	15:00	17:00	19:00	21:00	23:00	1:00	3:00	5:00	7:00
08/13/98	49.4					141.8							
08/28/98	16.9					109.5							
10/23/98	15.7			153		109.5							
04/29/99	11.7												
06/03/99	1.0												119.7
07/01/99	7.3									46.3	46.3		
07/15/99	1.1									49.4			
08/12/99	0.0											90.6	
08/26/99	20.3				109.5			90.6					
09/02/99	17.7								109.5	73.9			
09/09/99	10.8						73.9	119.7	59.2			66.3	
09/16/99	22.8		193	119.7			99.8						
09/23/99	31.7						73.9				66.3		
09/30/99	51.5			130.5							40.6		
10/14/99	36.9			130.5									
10/21/99	1.6												
11/11/99	6.5						130.5	59.2					
11/25/99	0.0												

Tabla 6. Valores atípicos en el efluente de las lagunas primarias.

Fecha	Precipitación mm/día	Valores atípicos en el efluente (L/s)											
		9:00	11:00	13:00	15:00	17:00	19:00	21:00	23:00	1:00	3:00	5:00	7:00
08/13/98	49.4												
08/28/98	16.9												
10/23/98	15.7												
04/29/99	11.7											47.3	44.8
06/03/99	1.0												
07/01/99	7.3	51.8											
07/15/99	1.1												
08/12/99	0.0												
08/26/99	20.3								50.7	43.3	33.8		
09/02/99	17.7								53.8	53	51	46	43
09/09/99	10.8							48.4	52.2	50.7	45.5	39.4	36.8
09/16/99	22.8	53	55.4		57.4	57	55.4	51.4	46.2	38.7			
09/23/99	31.7										34.7	44.8	46.2
09/30/99	51.5				55.4				44.8		47	40	35.6
10/14/99	36.9												
10/21/99	1.6	45.5											
11/11/99	6.5						52.6	53.8		41.4	33.2		
11/25/99	0.0	44.8											

Se observa que el Análisis Exploratorio de Datos (AED) aplicado a las mediciones de flujo mediante el uso de gráficas de cajas es de utilidad para identificar casos cuando los flujos están fuera del rango normal e indicar que se requiere mayor análisis para determinar la razón de estas variabilidades.

La figura 20 muestra los flujos de entrada y salida de las lagunas primarias durante un período con alta precipitación. Durante la noche del 29 de Junio se registraron 29.6mm de lluvia, el 30 de Junio se registraron 27mm durante el día y el 1 de Julio en la mañana cayeron 7.3mm. Las mediciones de flujo se realizaron el 29 y 30 de Junio de las 8:00 a las 18:00 horas, el 1 de Julio las mediciones se realizaron durante 24 horas. Los flujos se midieron en intervalos de 2 horas.

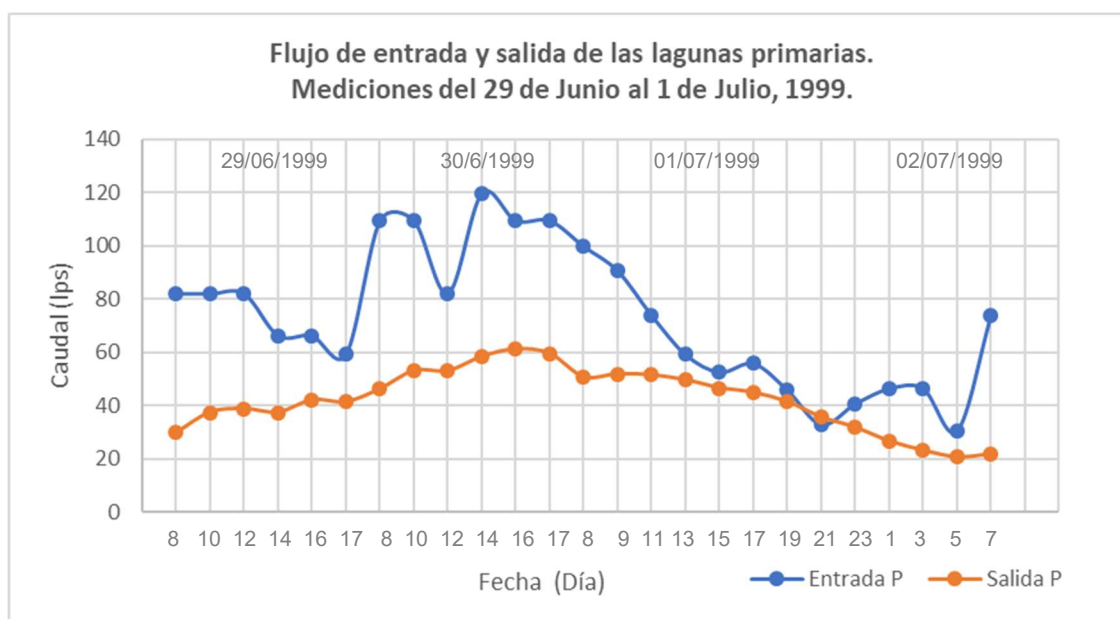


Figura 20. Comportamiento de flujo entrante y saliente las lagunas primarias durante un periodo lluvioso. La lluvia se refleja en el flujo entrante al sistema: especialmente durante todo el día del 30 de Junio el influente es mucho más alto que el flujo normal en época seca como se mostró en figuras 14 y 15. De igual forma se aprecia que el patrón del efluente cambia drásticamente, se suprime el ciclo diario. Como era de esperarse el efecto de la lluvia es amortiguado y retardado dentro del sistema.

La lluvia incrementa notoriamente el flujo del alcantarillado sanitario. Estos datos confirman en una forma más directa las conclusiones establecidas en el análisis exploratorio de datos. La infiltración de flujo subterráneo, escorrentía superficial y conexiones ilegales son significantes en el funcionamiento del sistema de alcantarillado y como consecuencia afectan el desempeño del sistema de tratamiento.

El aumento en el influente inicia a las 8:00 am del 30 de Junio, el resto del día se mantiene el flujo alto en comparación con el influente de un día en época seca (verano) como se mostró en las figuras 14 y 15. En la mañana del 2 de Julio se empieza a notar el comportamiento normal. De igual forma, el patrón del efluente cambia drásticamente, el ciclo diario normal se suprime. Como era de esperar los efectos de la lluvia son amortiguados y retardados.

Los efectos de la lluvia también se observan en las lagunas secundarias. El 29 de Junio el ciclo diario también se ve interrumpido, el 30 de Junio el influente y efluente son mucho más alto, el 1 de Julio aún persisten los efectos de la lluvia. La mayoría de los flujos son normales nuevamente el 2 de Julio cuando la lluvia fue mínima, sin embargo, también este día los flujos eran mayores en comparación al flujo normal de época seca. Especialmente en la laguna A1 los efectos de la lluvia fueron muy notorios como se aprecia en la Figura 21. La grafica muestra que inclusive el efluente supera el influente por casi 2lps el día 30 de Junio y por 1lps durante más de dos días.

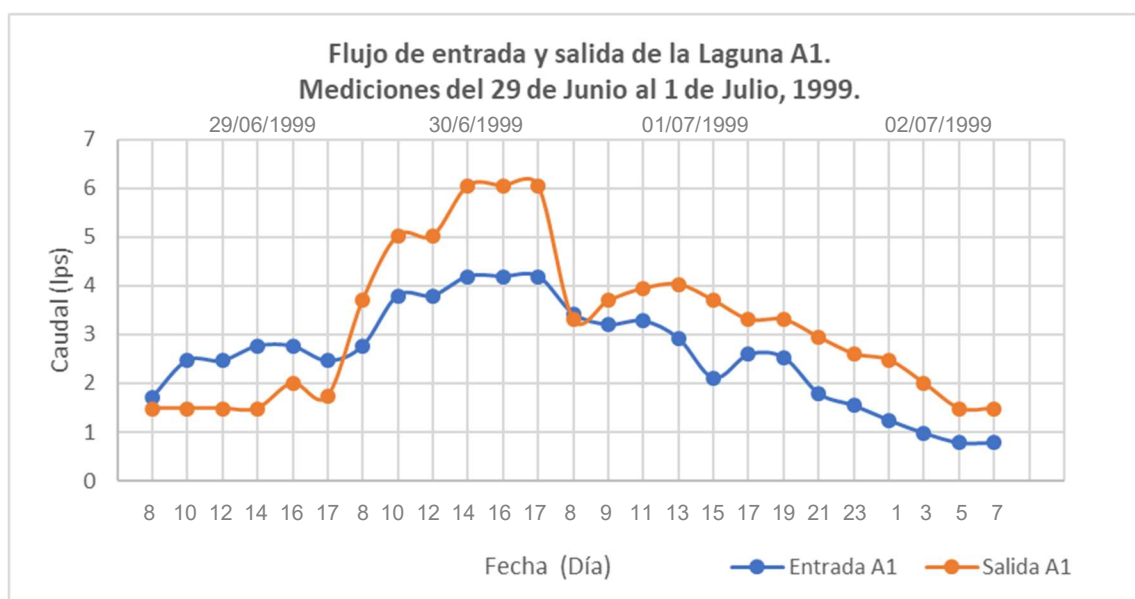


Figura 21. Comportamiento del flujo de entrada y salida de las lagunas secundarias A1 durante período lluvioso; El día 29 de Junio se interrumpe el ciclo diario, el día siguiente tanto el influente como efluente se ve considerablemente incrementado. El día 2 de Julio el influente regresa a su comportamiento normal.

6.1.3 Balance de agua en las lagunas

En esta sección se presentan los datos relacionados al balance de agua de las diferentes lagunas de la estación experimental de León.

El balance de agua de las lagunas se realizó en dos intervalos de tiempo. La sección 6.1.3.1 presenta el balance de agua para intervalos cortos, mediciones cada dos horas durante 24 horas. De este análisis se espera observar y analizar los efectos de la evapotranspiración en las lagunas.

La sección 6.1.3.2 presenta el balance de agua para intervalos de 24 horas, usando datos diarios de precipitación y evaporación (E). Este balance es útil para calcular las cargas de contaminantes, a como se presentará posteriormente en la sección 6.2.1.5.

6.1.3.1 Balance de agua a intervalos cortos

En esta sección se presenta el balance de agua de las lagunas secundarias a intervalos cortos, períodos de 2 horas.

El balance de agua es calculado para cada intervalo de medición, cada dos horas desde las 9:00am del día 15 de Abril hasta las 7:00am del día 16 de Abril. En estos días no ocurrió precipitación, así que este término fue descartado del análisis. Los valores de infiltración y evapotranspiración se consideran desconocidos. Por lo tanto, el balance de agua está dado por la siguiente expresión:

$$\text{Influyente} - \text{Efluente} = \text{Cambio Volumen} + \Delta$$

El término Δ representa la suma de la infiltración, evapotranspiración y el valor de error en las mediciones y cálculos.

La tabla 7 y 8 muestra las diferencias entre el influente y efluente y el cambio en volumen para cada intervalo.

Tabla 7. Diferencias entre influente y efluente para cada intervalo, día 15 de Abril

Intervalo	Influente -Efluente (m^3/s)				
	A1	A2	A3	B	C
9-11	0.0005	0.0010	0.0012	0.0029	0.0047
11-13	0.0011	0.0014	0.0013	0.0034	0.0048
13-15	0.0010	0.0012	0.0011	0.0031	0.0046
15-17	0.0006	0.0011	0.0009	0.0023	0.0035
17-19	0.0004	0.0009	0.0007	0.0014	0.0010
19-21	0.0029	0.0040	0.0036	0.0010	-0.0005
21-23	0.0004	0.0005	0.0003	-0.0003	-0.0015
23-1	-0.0002	0.0002	-0.0003	-0.0009	-0.0018
1-3	-0.0005	0.0001	-0.0004	-0.0013	-0.0023
3-5	-0.0004	0.0000	-0.0004	-0.0012	-0.0033
5-7	-0.0002	0.0002	-0.0003	-0.0004	-0.0011

Tabla 8. Cambio en el volumen de cada laguna para cada intervalo medido, día 15 de Abril.

Intervalo	Cambio en volumen (m^3)				
	A1	A2	A3	B	C
9-11	-7.6	-15.2	-7.6	-1.4	58.6
11-13	-9.1	0.0	6.1	2.9	22.0
13-15	16.8	15.2	16.7	12.9	14.7
15-17	0.0	-7.6	0.0	7.2	7.3
17-19	0.0	7.6	0.0	7.2	44.0
19-21	-15.3	0.0	-15.2	0.0	-73.3
21-23	0.0	0.0	15.2	0.0	0.0
23-1	12.2	0.0	0.0	-7.2	-58.6
1-3	-12.2	-15.2	-15.2	-7.2	-58.6
3-5	0.0	0.0	0.0	-14.4	-73.2
5-7	-15.2	-15.1	0.0	-14.3	-29.2

El cambio de volumen en las lagunas, para cada intervalo analizado de dos horas, oscila entre 0 m^3 y 16.8 m^3 para las lagunas A1, A2 y A3 y entre 0 m^3 y 73.3 m^3 para la laguna C.

En la tabla 9 se calcula el valor de Δ con la diferencia entre influente y efluente y con el cambio en volumen.

El cambio de volumen es calculado a partir de la siguiente expresión:

$$\text{Cambio en volumen (m}^3\text{/s)} = \frac{\text{Volumen inicial del intervalo (m}^3\text{)} - \text{Volumen final del intervalo (m}^3\text{)}}{7200 \text{ seg}}$$

El término Δ es la suma de la evapotranspiración, infiltración y el error en las mediciones y cálculo.

Tabla 9. Valores de Δ (Delta) para cada intervalo medido ($\Delta = \text{m}^3/\text{s}$), día 15 de Abril.

<i>Delta (m³/s) = (Influyente - Efluente) - Cambio de volumen</i>					
<i>Intervalo</i>	A1	A2	A3	B	C
9-11	0.0016	0.0031	0.0022	0.0031	-0.0034
11-13	0.0023	0.0014	0.0005	0.0030	0.0017
13-15	-0.0013	-0.0009	-0.0012	0.0013	0.0025
15-17	0.0006	0.0022	0.0009	0.0013	0.0025
17-19	0.0004	-0.0001	0.0007	0.0004	-0.0051
19-21	0.0050	0.0040	0.0057	0.0010	0.0097
21-23	0.0004	0.0005	-0.0018	-0.0003	-0.0015
23-1	-0.0019	0.0002	-0.0003	0.0001	0.0063
1-3	0.0012	0.0022	0.0018	-0.0003	0.0058
3-5	-0.0004	0.0000	-0.0004	0.0008	0.0069
5-7	0.0020	0.0023	-0.0003	0.0016	0.0030

Tabla 10. Valores de Δ (Delta) para cada intervalo medido ($\Delta = \text{mm}$), Día 15 de Abril.

<i>Delta (mm) = (Influyente -Efluente) - Cambio de Volumen</i>					
<i>Intervalo</i>	A1	A2	A3	B	C
9-11	7.5	14.9	10.5	4.9	-3.6
11-13	11.0	6.6	2.2	4.7	1.8
13-15	-6.3	-4.1	-5.8	2.0	2.7
15-17	2.9	10.2	4.2	2.0	2.6
17-19	1.7	-0.5	3.4	0.6	-5.3
19-21	23.7	19.1	27.2	1.6	10.1
21-23	1.8	2.2	-8.8	-0.4	-1.5
23-1	-8.9	0.8	-1.2	0.1	6.6
1-3	5.8	10.4	8.3	-0.5	6.1
3-5	-2.0	0.1	-1.9	1.2	7.2
5-7	9.3	11.1	-1.4	2.5	3.1
<i>Promedio</i>	4.2	6.4	3.3	1.7	2.7
<i>Desviación estándar</i>	9.0	7.3	9.7	1.8	4.7

Los valores para Δ son principalmente positivos, que representan de hecho evapotranspiración. El cálculo, sin embargo, pareciera muy impreciso. Esto es debido al amplio rango de fluctuación de volumen en cada intervalo analizado como se mostró y explicó en la Tabla 8. Con los datos disponible para trabajar el balance hídrico a intervalos cortos, ya no se puede investigar a más detalle, pero se puede ver que no es necesario mejorar mucho para hacer esto posible.

Esta mejora en la precisión de los datos sería de mucho valor para estudiar la evapotranspiración de una forma más directa, usando los datos de las lagunas. Cuando este análisis no puede ser hecho, como fue el caso, este término en la ecuación de balance debe ser calculado a partir de datos meteorológicos. Esto da una aproximación útil en algunos casos, pero el término de error involucrado no es conocido y no puede ser separado de los efectos locales. Ahora no es posible investigar el efecto de las plantas en la evapotranspiración en una escala corta de tiempo, no es posible extraer una curva diaria de evapotranspiración dado que la dispersión en los valores de Δ es muy alta como muestra el valor de la desviación estándar mostrado en la Tabla 10. Curvas de este tipo serían necesarias para correlacionar la tasa de evapotranspiración con datos meteorológicos como insolación, temperatura del aire, velocidad del viento y con propiedades de las lagunas como el tipo de laguna, tamaño y crecimiento de las plantas acuáticas.

Especialmente cuando se considera reúso del agua tratada, se requiere más conocimiento sobre la cantidad de evapotranspiración para tomar decisiones sobre que tipo de laguna usar. Aparte de mejorar la calidad del agua mediante la remoción de patógenos y contaminantes, las lagunas desmejoran por la evapotranspiración. Este efecto causa el incremento de la concentración de contaminantes, pero especialmente, incrementa el contenido de sales que no pueden ser removidos por procesos de tratamiento simples o económicos. Un alto contenido de sales es el factor principal limitante para el reúso de agua en áreas áridas.

El balance de agua a intervalos cortos requiere mediciones más precisas y cálculo de los componentes del balance. Se dan problemas similares como los ocurridos con la interpretación de los datos de lluvia, solo que la lluvia es mucho más variable en el tiempo en comparación a la evapotranspiración. De igual forma se requieren mediciones de evapotranspiración con mayor exactitud para obtener interpretaciones del balance de agua con más precisión en los lapsos de tiempo estudiados.

En las lagunas de la estación experimental de León, el nivel de agua es estimado midiendo la altura de agua sobre el vértice de un vertedero en la salida de cada laguna. Estas mediciones están referidas a una regla graduada a la cual se coloca su origen en el vértice del vertedero. Esta regla está graduada en cm, así que la precisión de las lecturas está hecha al cm más cercano según apreciación de la persona que realiza la medición. De los registros meteorológicos se observa que los valores de evaporación y evapotranspiración (Thornthwaite) pueden variar en 1mm, este cambio no puede ser visto en el nivel de agua debido a la imprecisión de las mediciones.

Esta forma de medición del nivel de agua en las lagunas puede ser una fuente de error si se da un accidente al posicionar la regla o cambios en la altura del vertedero y no se reporta al personal encargado de las mediciones. Un método más confiable de medición del nivel de agua es usando una referencia fija para obtener alturas absolutas.

Incrementando la precisión de las mediciones del nivel de agua de 1cm a 1mm, además de incrementar la frecuencia una vez cada 15 minutos, y haciendo mediciones de precipitaciones con la misma frecuencia, haría posible la investigación del ciclo diario del agua en las lagunas con mejores detalles.

6.1.3.2 Balance de agua en intervalos de 24 horas

En esta sección se presenta el balance de agua en intervalos de 24 horas. Los flujos utilizados son el promedio aritmético de mediciones hechas a intervalos de 2 horas durante 24 horas.

Dado que la variación en el nivel de agua durante un largo período genera valores positivos y negativos, esto hace un balance al final del período asumiendo que no hay cambios en el volumen de la laguna. Por lo tanto, el cambio en el volumen de la laguna es considerado como cero. Así, la ecuación de balance a aplicar es:

$$\text{Influyente} + \text{Precipitación} = (\text{Efluente} + \text{Evaporación}) + \Delta$$

Los datos de precipitación y evaporación se tomaron de registros meteorológicos y fueron dados en una base de datos diaria. La evaporación corresponde a las mediciones hechas en un evaporímetro de Piche (registros dados por INETER). Los datos de tanque no son usados dado que no hay un registro completo para todas las fechas analizadas. El término evapotranspiración tampoco es utilizado dado que es una fórmula analítica que genera un valor basado solo en la latitud y la temperatura promedio mensual.

El término Δ incluye los valores de infiltración, dado que es desconocido, y el término de error en las mediciones y en el cálculo.

En las tablas 11 a la 16 se presentan los cálculos de los balances de agua para períodos de 24 horas. Los valores de Δ fueron calculados, Δ_1 representa las diferencias entre el influente y efluente antes del balance y Δ_2 representa la diferencia entre influente y efluente después que los flujos fueron corregidos con los datos de precipitación y evaporación respectivamente.

Estas tablas muestran que los valores de Δ_1 son más altos y los valores de evaporación y precipitación no llegan a balancear el valor de Δ_1 . Después de que la precipitación y evaporación son sumados al efluente e influente respectivamente, los valores de Δ_2 permanecen altos.

Cuando el balance es realizado para días sin lluvias, el valor de Δ_1 es modificado únicamente por el dato de evaporación. Sin embargo, el término de evaporación no tiene una influencia significativa dado que la diferencia entre Δ_1 y Δ_2 es pequeña y en algunos casos no hay diferencia. Esto se puede apreciar para el período seco (sin lluvias) del 25 de Febrero al 17 de Junio, 1999. Los valores de evaporación estimados a partir de registros meteorológicos no son representativos de la cantidad de agua perdida en las lagunas.

Por otro lado, la precipitación si causa una variación significativa en el término influente del balance, especialmente cuando la cantidad de lluvia es alta. En algunos casos esta hace que el valor de Δ_2 sea mayor que Δ_1 .

Tabla 11. Balance de agua diario para las lagunas primarias.

Fecha	Influente	Efluente	Precipitación	Evaporación	Precipitación	Evaporación	Infl+P	Efl+E	Delta 1	Delta 2
	m ³ /s	m ³ /s	P(mm)	E (mm)	P (m ³ /s)	E (m ³ /s)	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s
09/25/98	0.051	0.029	37.50	1.90	0.0103	0.0005	0.061	0.030	0.021	0.031
10/09/98	0.043	0.027	4.20	2.20	0.0012	0.0006	0.044	0.028	0.016	0.017
10/23/98	0.061	0.038	15.70	0.30	0.0043	0.0001	0.065	0.038	0.023	0.027
11/20/98	0.039	0.030	2.10	1.90	0.0006	0.0005	0.040	0.031	0.009	0.009
12/04/98	0.037	0.029	0.00	2.60	0.0000	0.0007	0.037	0.030	0.008	0.007
02/25/99	0.040	0.025	0.00	11.10	0.0000	0.0030	0.040	0.028	0.014	0.011
03/04/99	0.050	0.025	0.00	9.60	0.0000	0.0026	0.050	0.028	0.025	0.022
03/18/99	0.045	0.029	0.00	8.50	0.0000	0.0023	0.045	0.031	0.017	0.014
04/15/99	0.040	0.030	0.00	8.30	0.0000	0.0023	0.040	0.032	0.010	0.007
04/22/99	0.047	0.036	0.00	11.80	0.0000	0.0032	0.047	0.040	0.011	0.008
04/29/99	0.054	0.041	11.70	3.80	0.0032	0.0010	0.057	0.042	0.014	0.016
05/06/99	0.042	0.031	0.00	4.60	0.0000	0.0013	0.042	0.032	0.011	0.010
05/13/99	0.053	0.036	20.50	4.00	0.0056	0.0011	0.058	0.037	0.017	0.021
05/20/99	0.041	0.033	2.50	5.10	0.0007	0.0014	0.042	0.035	0.008	0.007
05/27/99	0.060	0.032	0.00	6.30	0.0000	0.0017	0.060	0.034	0.028	0.026
06/03/99	0.060	0.033	0.00	3.40	0.0000	0.0009	0.060	0.034	0.027	0.026
06/17/99	0.046	0.031	0.10	2.80	0.0000	0.0008	0.046	0.032	0.014	0.014
07/01/99	0.051	0.036	7.30	1.00	0.0020	0.0003	0.053	0.036	0.015	0.017
07/15/99	0.049	0.032	1.10	1.20	0.0003	0.0003	0.049	0.032	0.017	0.017
08/12/99	0.051	0.030	0.00	5.20	0.0000	0.0014	0.051	0.032	0.021	0.020
08/19/99	0.044	0.032	0.00	2.80	0.0000	0.0008	0.044	0.033	0.012	0.011
08/26/99	0.067	0.043	20.30	1.40	0.0056	0.0004	0.073	0.044	0.024	0.029
09/02/99	0.060	0.044	17.70	3.00	0.0049	0.0008	0.065	0.045	0.015	0.019
09/09/99	0.054	0.044	10.80	2.30	0.0030	0.0006	0.057	0.044	0.011	0.013
09/16/99	0.063	0.045	22.80	0.70	0.0063	0.0002	0.069	0.046	0.018	0.024
09/23/99	0.061	0.036	31.70	1.70	0.0087	0.0005	0.070	0.036	0.026	0.034
09/30/99	0.061	0.048	51.50	1.00	0.0141	0.0003	0.075	0.048	0.013	0.027
10/07/99	0.050	0.034	0.00	1.10	0.0000	0.0003	0.050	0.034	0.017	0.016
10/14/99	0.049	0.037	36.90	1.00	0.0101	0.0003	0.059	0.038	0.011	0.021
10/21/99	0.047	0.033	1.60	1.50	0.0004	0.0004	0.047	0.034	0.014	0.014
10/28/99	0.048	0.030	0.00	2.50	0.0000	0.0007	0.048	0.031	0.017	0.017
11/04/99	0.048	0.032	0.00	4.20	0.0000	0.0012	0.048	0.033	0.016	0.015
11/11/99	0.058	0.040	6.50	1.50	0.0018	0.0004	0.060	0.041	0.018	0.019
11/18/99	0.054	0.039	0.00	2.00	0.0000	0.0005	0.054	0.040	0.014	0.013
11/25/99	0.047	0.034	0.00	2.50	0.0000	0.0007	0.047	0.035	0.012	0.012
12/02/99	0.045	0.030	0.00	3.50	0.0000	0.0010	0.045	0.031	0.015	0.014
12/09/99	0.050	0.035	0.00	5.10	0.0000	0.0014	0.050	0.036	0.015	0.014
Promedio									0.016	0.017
Desv. Est									0.005	0.007
DEst%media									33	41

Tabla 12. Balance de agua diario para la Laguna A1.

Fecha	Influyente	Efluente	Precipitación	Evaporación	Precipitación	Evaporación	Infl+P	Eflu+E	Delta 1	Delta 2
	m3/s	m3/s	P(mm)	E(mm)	P (m3/s)	E (m3/s)	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s
08/13/98	0.0041	0.0053	49.40	0.80	0.0009	0.00001	0.0050	0.0053	-0.0011	-0.0003
08/28/98	0.0025	0.0028	16.90	2.30	0.0003	0.00004	0.0028	0.0029	-0.0003	0.0000
09/10/98	0.0011	0.0014	0.00	1.50	0.0000	0.00003	0.0011	0.0014	-0.0002	-0.0003
09/25/98	0.0045	0.0052	37.50	1.90	0.0007	0.00003	0.0052	0.0053	-0.0007	-0.0001
10/09/98	0.0029	0.0034	4.20	2.20	0.0001	0.00004	0.0030	0.0034	-0.0004	-0.0004
10/23/98	0.0035	0.0037	15.70	0.30	0.0003	0.00001	0.0038	0.0037	-0.0002	0.0001
11/20/98	0.0026	0.0019	2.10	1.90	0.0000	0.00003	0.0027	0.0019	0.0007	0.0007
12/04/98	0.0031	0.0022	0.00	2.60	0.0000	0.00005	0.0031	0.0022	0.0009	0.0009
02/25/99	0.0014	0.0009	0.00	11.10	0.0000	0.00019	0.0014	0.0011	0.0005	0.0003
03/05/99	0.0013	0.0012	0.00	9.60	0.0000	0.00017	0.0013	0.0013	0.0002	0.0000
03/18/99	0.0021	0.0016	0.00	8.50	0.0000	0.00015	0.0021	0.0018	0.0005	0.0003
03/25/99	0.0024	0.0019	0.00	11.20	0.0000	0.00020	0.0024	0.0021	0.0005	0.0003
04/08/99	0.0038	0.0032	0.00	13.10	0.0000	0.00023	0.0038	0.0035	0.0006	0.0004
04/15/99	0.0019	0.0017	0.00	8.30	0.0000	0.00015	0.0019	0.0018	0.0002	0.0001
04/22/99	0.0022	0.0019	0.00	11.80	0.0000	0.00021	0.0022	0.0021	0.0003	0.0001
04/29/99	0.0044	0.0036	11.70	3.80	0.0002	0.00007	0.0046	0.0036	0.0008	0.0009
05/06/99	0.0017	0.0015	0.00	4.60	0.0000	0.00008	0.0017	0.0016	0.0002	0.0001
05/13/99	0.0020	0.0015	20.50	4.00	0.0004	0.00007	0.0023	0.0016	0.0005	0.0007
05/20/99	0.0018	0.0013	2.50	5.10	0.0000	0.00009	0.0018	0.0014	0.0005	0.0004
05/27/99	0.0016	0.0012	0.00	6.30	0.0000	0.00011	0.0016	0.0013	0.0005	0.0003
06/03/99	0.0017	0.0014	0.00	3.40	0.0000	0.00006	0.0017	0.0015	0.0003	0.0002
06/17/99	0.0016	0.0023	0.10	2.80	0.0000	0.00005	0.0016	0.0024	-0.0007	-0.0007
07/01/99	0.0019	0.0029	7.30	1.00	0.0001	0.00002	0.0020	0.0029	-0.0010	-0.0009
07/15/99	0.0015	0.0016	1.10	1.20	0.0000	0.00002	0.0016	0.0016	-0.0001	-0.0001
Promedio									0.0001	0.0001
Desv. Est									0.0006	0.0005
DEst%media									609	347

Tabla 13. Balance de agua diario para la Laguna A2.

Fecha	Influente	Efluente	Precipitación	Evaporación	Precipitación	Evaporación	Infl+P	Eflu+E	Delta 1	Delta 2
	m3/s	m3/s	P(mm)	E(mm)	P (m3/s)	E (m3/s)	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s
07/31/98	0.0026	0.0022	0.00	1.30	0.0000	0.00002	0.0026	0.0022	0.0005	0.0005
08/13/98	0.0047	0.0058	49.40	0.80	0.0009	0.00001	0.0056	0.0058	-0.0011	-0.0002
08/28/98	0.0030	0.0031	16.90	2.30	0.0003	0.00004	0.0033	0.0032	-0.0001	0.0001
09/10/98	0.0013	0.0008	0.00	1.50	0.0000	0.00003	0.0013	0.0009	0.0005	0.0005
09/25/98	0.0054	0.0052	37.50	1.90	0.0007	0.00003	0.0061	0.0053	0.0002	0.0008
10/09/98	0.0035	0.0035	4.20	2.20	0.0001	0.00004	0.0036	0.0036	0.0000	0.0000
10/23/98	0.0041	0.0037	15.70	0.30	0.0003	0.00001	0.0044	0.0037	0.0004	0.0007
11/20/98	0.0031	0.0018	2.10	1.90	0.0000	0.00003	0.0031	0.0018	0.0014	0.0014
12/04/98	0.0037	0.0022	0.00	2.60	0.0000	0.00005	0.0037	0.0023	0.0015	0.0014
02/25/99	0.0012	0.0011	0.00	11.10	0.0000	0.00020	0.0012	0.0013	0.0001	-0.0001
03/05/99	0.0011	0.0015	0.00	9.60	0.0000	0.00017	0.0011	0.0017	-0.0004	-0.0005
03/18/99	0.0018	0.0010	0.00	8.50	0.0000	0.00015	0.0018	0.0011	0.0008	0.0007
03/25/99	0.0020	0.0010	0.00	11.20	0.0000	0.00020	0.0020	0.0012	0.0010	0.0008
04/08/99	0.0033	0.0020	0.00	13.10	0.0000	0.00023	0.0033	0.0022	0.0013	0.0011
04/15/99	0.0016	0.0009	0.00	8.30	0.0000	0.00015	0.0016	0.0011	0.0007	0.0005
04/22/99	0.0018	0.0011	0.00	11.80	0.0000	0.00021	0.0018	0.0013	0.0008	0.0006
04/29/99	0.0038	0.0025	11.70	3.80	0.0002	0.00007	0.0040	0.0026	0.0013	0.0014
05/06/99	0.0014	0.0009	0.00	4.60	0.0000	0.00008	0.0014	0.0010	0.0005	0.0004
05/13/99	0.0017	0.0011	20.50	4.00	0.0004	0.00007	0.0021	0.0012	0.0006	0.0009
05/20/99	0.0015	0.0011	2.50	5.10	0.0000	0.00009	0.0016	0.0012	0.0005	0.0004
05/27/99	0.0015	0.0009	0.00	6.30	0.0000	0.00011	0.0015	0.0010	0.0006	0.0005
06/03/99	0.0017	0.0008	0.00	3.40	0.0000	0.00006	0.0017	0.0009	0.0008	0.0008
06/17/99	0.0016	0.0010	0.10	2.80	0.0000	0.00005	0.0017	0.0010	0.0007	0.0006
07/01/99	0.0019	0.0016	7.30	1.00	0.0001	0.00002	0.0021	0.0016	0.0003	0.0005
07/15/99	0.0015	0.0007	1.10	1.20	0.0000	0.00002	0.0015	0.0007	0.0008	0.0008
Promedio									0.0005	0.0006
Desv. Est									0.0006	0.0005
DEst%media									108	84

Tabla 14. Balance de agua diario para la laguna A3.

Fecha	Influyente	Efluente	Precipitación	Evaporación	Precipitación	Evaporación	Infl+P	Eflu+E	Delta 1	Delta 2
	m3/s	m3/s	P(mm)	E(mm)	P (m3/s)	E (m3/s)	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s
07/31/98	0.0027	0.0024	0.00	1.30	0.00000	0.00002	0.0027	0.0024	0.0003	0.0003
08/13/98	0.0045	0.0060	49.40	0.80	0.00089	0.00001	0.0054	0.0060	-0.0015	-0.0006
08/28/98	0.0027	0.0029	16.90	2.30	0.00030	0.00004	0.0030	0.0029	-0.0002	0.0000
09/10/98	0.0011	0.0012	0.00	1.50	0.00000	0.00003	0.0011	0.0012	0.0000	-0.0001
09/25/98	0.0047	0.0054	37.50	1.90	0.00068	0.00003	0.0054	0.0055	-0.0007	-0.0001
10/09/98	0.0031	0.0035	4.20	2.20	0.00008	0.00004	0.0031	0.0035	-0.0005	-0.0004
10/23/98	0.0036	0.0042	15.70	0.30	0.00028	0.00001	0.0039	0.0042	-0.0006	-0.0003
11/20/98	0.0027	0.0022	2.10	1.90	0.00004	0.00003	0.0027	0.0022	0.0005	0.0005
12/04/98	0.0031	0.0030	0.00	2.60	0.00000	0.00005	0.0031	0.0030	0.0002	0.0001
02/25/99	0.0012	0.0012	0.00	11.10	0.00000	0.00020	0.0012	0.0014	0.0000	-0.0002
03/05/99	0.0011	0.0011	0.00	9.60	0.00000	0.00017	0.0011	0.0013	0.0000	-0.0002
03/18/99	0.0019	0.0011	0.00	8.50	0.00000	0.00015	0.0019	0.0012	0.0008	0.0007
03/25/99	0.0021	0.0011	0.00	11.20	0.00000	0.00020	0.0021	0.0013	0.0010	0.0008
04/08/99	0.0037	0.0020	0.00	13.10	0.00000	0.00023	0.0037	0.0022	0.0018	0.0015
04/15/99	0.0017	0.0013	0.00	8.30	0.00000	0.00015	0.0017	0.0014	0.0004	0.0003
04/22/99	0.0020	0.0012	0.00	11.80	0.00000	0.00021	0.0020	0.0014	0.0009	0.0007
04/29/99	0.0042	0.0026	11.70	3.80	0.00021	0.00007	0.0044	0.0027	0.0016	0.0017
05/06/99	0.0015	0.0009	0.00	4.60	0.00000	0.00008	0.0015	0.0010	0.0006	0.0005
05/13/99	0.0015	0.0010	20.50	4.00	0.00036	0.00007	0.0019	0.0011	0.0005	0.0008
05/20/99	0.0016	0.0011	2.50	5.10	0.00004	0.00009	0.0017	0.0012	0.0006	0.0005
05/27/99	0.0015	0.0009	0.00	6.30	0.00000	0.00011	0.0015	0.0010	0.0006	0.0005
06/03/99	0.0016	0.0010	0.00	3.40	0.00000	0.00006	0.0016	0.0010	0.0006	0.0006
06/17/99	0.0016	0.0012	0.10	2.80	0.00000	0.00005	0.0016	0.0013	0.0004	0.0003
07/01/99	0.0019	0.0016	7.30	1.00	0.00013	0.00002	0.0021	0.0016	0.0004	0.0005
07/15/99	0.0014	0.0009	1.10	1.20	0.00002	0.00002	0.0014	0.0010	0.0004	0.0004
Promedio									0.0003	0.0004
Desv. Est									0.0007	0.0006
DEst%media									219	153

Tabla 15. Balance de agua diario para la Laguna B.

Fecha	Influente	Efluente	Precipitación	Evaporación	Precipitación	Evaporación	Infl+P	Eflu+E	Delta 1	Delta 2
	m3/s	m3/s	P(mm)	E(mm)	P (m3/s)	E (m3/s)	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s
09/25/98	0.0178	0.0163	37.50	1.90	0.0021	0.00011	0.0199	0.0164	0.0015	0.0035
10/09/98	0.0124	0.0110	4.20	2.20	0.0002	0.00012	0.0127	0.0111	0.0014	0.0015
10/23/98	0.0126	0.0095	15.70	0.30	0.0009	0.00002	0.0134	0.0095	0.0031	0.0039
02/25/99	0.0043	0.0062	0.00	11.10	0.0000	0.00060	0.0043	0.0068	-0.0019	-0.0025
03/05/99	0.0041	0.0048	0.00	9.60	0.0000	0.00052	0.0041	0.0053	-0.0007	-0.0012
03/18/99	0.0045	0.0032	0.00	8.50	0.0000	0.00045	0.0045	0.0037	0.0013	0.0008
03/25/99	0.0042	0.0018	0.00	11.20	0.0000	0.00059	0.0042	0.0024	0.0024	0.0018
04/08/99	0.0089	0.0065	0.00	13.10	0.0000	0.00071	0.0089	0.0072	0.0024	0.0017
04/15/99	0.0041	0.0032	0.00	8.30	0.0000	0.00044	0.0041	0.0036	0.0009	0.0005
04/22/99	0.0049	0.0034	0.00	11.80	0.0000	0.00063	0.0049	0.0040	0.0015	0.0009
04/29/99	0.0044	0.0015	11.70	3.80	0.0006	0.00020	0.0050	0.0017	0.0028	0.0032
05/06/99	0.0039	0.0022	0.00	4.60	0.0000	0.00024	0.0039	0.0024	0.0017	0.0014
05/13/99	0.0049	0.0023	20.50	4.00	0.0011	0.00021	0.0060	0.0025	0.0026	0.0035
05/20/99	0.0043	0.0018	2.50	5.10	0.0001	0.00027	0.0045	0.0020	0.0026	0.0024
05/27/99	0.0040	0.0019	0.00	6.30	0.0000	0.00033	0.0040	0.0022	0.0021	0.0018
06/03/99	0.0041	0.0019	0.00	3.40	0.0000	0.00018	0.0041	0.0021	0.0022	0.0021
06/17/99	0.0040	0.0029	0.10	2.80	0.0000	0.00015	0.0040	0.0030	0.0011	0.0009
07/01/99	0.0052	0.0041	7.30	1.00	0.0004	0.00005	0.0056	0.0041	0.0011	0.0015
07/15/99	0.0044	0.0030	1.10	1.20	0.0001	0.00006	0.0044	0.0031	0.0014	0.0014
08/12/99	0.0049	0.0046	0.00	5.20	0.0000	0.00028	0.0049	0.0049	0.0003	0.0000
08/19/99	0.0112	0.0062	0.00	2.80	0.0000	0.00015	0.0112	0.0064	0.0050	0.0049
08/26/99	0.0166	0.011	20.30	1.40	0.0011	0.00008	0.0177	0.0107	0.0059	0.0069
09/02/99	0.0165	0.011	17.70	3.00	0.0010	0.00016	0.0174	0.0110	0.0056	0.0064
09/09/99	0.0152	0.013	10.80	2.30	0.0006	0.00013	0.0158	0.0132	0.0021	0.0026
09/16/99	0.0177	0.015	22.80	0.70	0.0013	0.00004	0.0190	0.0152	0.0025	0.0038
09/23/99	0.0124	0.009	31.70	1.70	0.0017	0.00009	0.0141	0.0088	0.0037	0.0054
09/30/99	0.0174	0.013	51.50	1.00	0.0028	0.00006	0.0203	0.0130	0.0044	0.0072
10/07/99	0.0123	0.010	0.00	1.10	0.0000	0.00006	0.0123	0.0096	0.0027	0.0027
10/14/99	0.0138	0.010	36.90	1.00	0.0020	0.00005	0.0158	0.0104	0.0035	0.0054
10/21/99	0.0126	0.011	1.60	1.50	0.0001	0.00009	0.0127	0.0109	0.0018	0.0018
10/28/99	0.0111	0.005	0.00	2.50	0.0000	0.00015	0.0111	0.0056	0.0056	0.0054
11/04/99	0.0106	0.008	0.00	4.20	0.0000	0.00025	0.0106	0.0086	0.0023	0.0020
11/11/99	0.0141	0.012	6.50	1.50	0.0004	0.00009	0.0144	0.0118	0.0024	0.0027
11/18/99	0.0142	0.012	0.00	2.00	0.0000	0.00012	0.0142	0.0125	0.0018	0.0016
11/25/99	0.0105	0.010	0.00	2.50	0.0000	0.00015	0.0105	0.0104	0.0002	0.0001
12/02/99	0.0111	0.009	0.00	3.50	0.0000	0.00021	0.0111	0.0093	0.0019	0.0017
12/09/99	0.0125	0.011	0.00	5.10	0.0000	0.00031	0.0125	0.0115	0.0013	0.0010
Promedio									0.0022	0.0025
Desv. Est									0.0016	0.0022
DEst%media									73	88

Tabla 16. Balance de agua diario para la Laguna C.

Fecha	Influyente	Efluente	Precipitación	Evaporación	Precipitación	Evaporación	Infl+P	Eflu+E	Delta 1	Delta 2
	m3/s	m3/s	P(mm)	E(mm)	P (m3/s)	E (m3/s)	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s
04/29/99	0.0250	0.0066	11.70	3.80	0.0009	0.00030	0.0260	0.0069	0.0184	0.0190
05/06/99	0.0246	0.0097	0.00	4.60	0.0000	0.00037	0.0246	0.0101	0.0149	0.0145
05/13/99	0.0276	0.0104	20.50	4.00	0.0016	0.00032	0.0292	0.0108	0.0171	0.0184
05/20/99	0.0259	0.0105	2.50	5.10	0.0002	0.00041	0.0261	0.0109	0.0154	0.0152
05/27/99	0.0250	0.0100	0.00	6.30	0.0000	0.00050	0.0250	0.0105	0.0150	0.0145
06/03/99	0.0254	0.0102	0.00	3.40	0.0000	0.00027	0.0254	0.0104	0.0152	0.0149
06/17/99	0.0253	0.0115	0.10	2.80	0.0000	0.00022	0.0253	0.0118	0.0137	0.0135
07/01/99	0.0272	0.0136	7.30	1.00	0.0006	0.00008	0.0277	0.0137	0.0135	0.0140
07/15/99	0.0253	0.0098	1.10	1.20	0.0001	0.00010	0.0254	0.0099	0.0155	0.0155
08/12/99	0.0215	0.0084	0.00	5.20	0.0000	0.00041	0.0215	0.0088	0.0131	0.0126
08/19/99	0.0115	0.0030	0.00	2.80	0.0000	0.00022	0.0115	0.0032	0.0085	0.0083
08/26/99	0.0159	0.005	20.30	1.40	0.0016	0.00011	0.0175	0.0055	0.0106	0.0121
09/02/99	0.0155	0.004	17.70	3.00	0.0014	0.00024	0.0169	0.0047	0.0111	0.0122
09/09/99	0.0151	0.014	10.80	2.30	0.0009	0.00018	0.0159	0.0138	0.0014	0.0021
09/16/99	0.0167	0.023	22.80	0.70	0.0018	0.00006	0.0186	0.0232	-0.0064	-0.0046
09/23/99	0.0123	0.009	31.70	1.70	0.0025	0.00014	0.0149	0.0093	0.0032	0.0055
09/30/99	0.0168	0.014	51.50	1.00	0.0041	0.00008	0.0209	0.0136	0.0033	0.0073
10/07/99	0.0116	0.008	0.00	1.10	0.0000	0.00009	0.0116	0.0085	0.0033	0.0032
10/14/99	0.0137	0.010	36.90	1.00	0.0029	0.00008	0.0167	0.0100	0.0038	0.0067
10/21/99	0.0140	0.013	1.60	1.50	0.0001	0.00012	0.0141	0.0130	0.0011	0.0012
10/28/99	0.0114	0.007	0.00	2.50	0.0000	0.00020	0.0114	0.0071	0.0044	0.0042
11/04/99	0.0112	0.009	0.00	4.20	0.0000	0.00033	0.0112	0.0089	0.0026	0.0023
11/11/99	0.0151	0.012	6.50	1.50	0.0005	0.00012	0.0157	0.0122	0.0030	0.0034
11/18/99	0.0140	0.012	0.00	2.00	0.0000	0.00016	0.0140	0.0121	0.0020	0.0019
11/25/99	0.0142	0.009	0.00	2.50	0.0000	0.00020	0.0142	0.0096	0.0048	0.0046
12/02/99	0.0121	0.008	0.00	3.50	0.0000	0.00028	0.0121	0.0086	0.0038	0.0035
12/09/99	0.0118	0.010	0.00	5.10	0.0000	0.00041	0.0118	0.0102	0.0021	0.0017
Promedio									0.0079	0.0084
Desv. Est									0.0065	0.0063
DEst%media									82	75

La tabla 17 muestra los promedios y la desviación estándar de $\Delta 1$ y $\Delta 2$ para los días sin lluvia cuando el término $\Delta 1$ es corregido únicamente por el efecto de la evaporación. La desviación estándar calculada como porcentaje de la media permite determinar si el término evaporación es significativo en el balance.

Tabla 17. Análisis estadístico de la influencia de la evaporación en el valor de $\Delta 1$.

Los datos son para días sin precipitación cuando el valor de delta 1 es balanceado únicamente por el efecto de evaporación.

		<i>P</i>	<i>A1</i>	<i>A2</i>	<i>A3</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
<i>Delta 1</i>	Promedio	0.0161	0.0004	0.0007	0.0006	0.0017	0.0075
	Desv Est	0.0056	0.0003	0.0005	0.0005	0.0017	0.0055
	Desv Est (%media)	35	78	72	90	98	74
<i>Delta 2</i>	Promedio	0.0147	0.0002	0.0006	0.0004	0.0014	0.0072
	Desv Est	0.0057	0.0003	0.0005	0.0005	0.0018	0.0054
	Desv Est (%media)	39	120	92	110	128	76

La desviación estándar (% de la media) incrementa después que $\Delta 1$ es corregido por el valor de evaporación. Esto indica que los valores de evaporación no son significantes para balancear el valor de $\Delta 1$.

A partir del balance de agua diario realizado se puede concluir que los valores de evaporación tomados de datos meteorológicos no son representativos para la cantidad de agua que se pierde en las lagunas. Es necesario tener medidas más precisas de los niveles de agua a intervalos cortos para estimar la evaporación real en las lagunas y el efecto de la transpiración en el sistema con plantas acuáticas. De la misma forma, dado que el término $\Delta 2$ también contiene el dato de infiltración que es desconocido, se hace necesario también realizar estudios de agua subterránea para confirmar si parte del valor de $\Delta 2$ corresponde a agua perdida por infiltración.

Los datos de influente y efluente corregidos por precipitación y evaporación serán usados para calcular las cargas entrantes y salientes de contaminantes, esto es presentado en la sección 6.2.1.5.

6.2 Análisis de la variabilidad del desempeño de las lagunas basado en mediciones de concentraciones de contaminantes y en mediciones de cargas contaminantes.

El desempeño de las lagunas puede ser estimado en base a la remoción de concentraciones de las sustancias y en base a la remoción de cargas contaminantes en las cuales el régimen de caudales determina su comportamiento.

6.2.1 Análisis de la variabilidad de datos de mediciones de concentraciones en la entrada y salida de las lagunas.

Para estimar el desempeño de los sistemas de lagunas se realizan las mediciones de las concentraciones de los principales parámetros que caracterizan las aguas residuales.

En la estación experimental se midieron las concentraciones de DBO_5 , DQO, Sólidos Suspendidos Totales, Sólidos totales, Nitrógeno Total, Fósforo y Coliformes Fecales.

Dado que las mediciones de DBO_5 son los datos más precisos dentro de los diversos compuestos medidos en la estación experimental, estos fueron analizados con más detalle. En Anexo 5 se presentan los análisis de las concentraciones para los otros compuestos medidos. Sin embargo, la precisión de estas otras medidas limitó las interpretaciones a una mayor escala.

6.2.1.1 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5)

La figura 22 resume las medidas semanales de DBO_5 hechas en los canales de entrada y salida de las lagunas de la estación experimental. De la gráfica podemos deducir que los procesos que se dan en las lagunas primarias y secundarias reducen la mediana de las concentraciones, así como la variabilidad de los valores. Casi no se da sobre posición de los datos cuando se comparan los datos de entrada y salida de las lagunas, indicando que la mejora en la calidad del agua representada por la reducción de DBO_5 ocurre casi siempre. En contraste, los valores de la mediana, así como la variabilidad en los datos de salida de las lagunas secundarias son muy similares, indicando preliminarmente que la diferencia en las estructuras de

estas lagunas, así como la presencia o ausencia de planta acuáticas macrófitas, no tiene un gran efecto en la remoción de DBO₅.

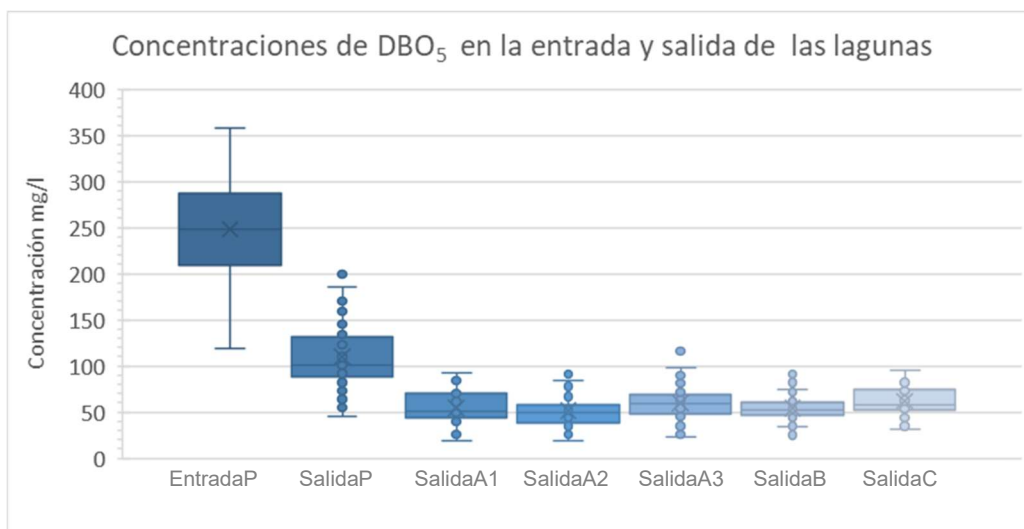


Figura 22. Gráfico de cajas de las concentraciones de DBO₅ en los canales de entrada y salida de las lagunas de la estación experimental.

Los valores de salida del sistema oscilan entre 20 y 100mg/L. Los procesos internos de las lagunas primarias y secundarias reducen la media de las concentraciones, así como la variabilidad. La mediana y la variabilidad de los datos en las lagunas secundarias son similares. Los datos de Entrada P son casi simétricos al igual que los datos de Salida A2, A3 y B, pero estos últimos muestran valores atípicos en el rango superior.

De la figura 22 se vio que la variabilidad es aproximadamente proporcional a la cantidad de DBO₅ presente en las muestras. De esta observación se puede concluir que los procedimientos de laboratorio no contribuyen mucho a la variabilidad. Se esperaría que la mayor presencia de partículas en el agua residual cruda que llega del alcantarillado sanitario contribuyera a la variabilidad de los resultados del análisis de DBO₅; esto no se refleja en los datos y, por lo tanto, probablemente tampoco juegue un papel importante aquí. El manejo de la muestra podría causar este efecto: si durante el transporte y almacenamiento parte de la materia orgánica presente se descompone, esta sería una fracción proporcional a la cantidad presente. Sin embargo, lo más probable es que los datos representen irregularidades como ocurre en los líquidos muestreados.

En la Tabla 18 se presenta el resumen estadístico de los datos de concentraciones de DBO₅.

Tabla 18. Resumen estadístico para los datos de DBO₅, en mgO₂ por litro.

	EP	SP	A1	A2	A3	B	C
<i>Elementos N:</i>	47.0	47.0	17.0	28.0	46.0	36.0	27.0
<i>Mínimo:</i>	119.0	45.0	19.4	19.0	22.5	25.0	31.0
<i>Media:</i>	248.3	109.8	54.3	51.5	60.2	54.7	62.2
<i>Mediana:</i>	248.0	101.0	50.5	50.0	59.8	52.2	58.4
<i>Máximo:</i>	358.0	200.0	92.0	92.0	118.0	99.0	96.0
<i>Desviación Estándar</i>	54.3	35.3	20.6	18.6	20.4	15.6	16.3
<i>Error estándar Media</i>	7.9	5.1	5.0	3.5	3.0	2.6	3.1

Dada la gran variabilidad de los datos, debemos preguntarnos si es posible llegar a la conclusión de que las diferencias en la concentración entre los sistemas son reales o están dentro del error de medición. Para hacer esto, una regla general simple es que, cuando las desviaciones estándar de la media de dos conjuntos de mediciones se tocan, pero no se superponen, los promedios pueden considerarse significativamente diferentes en aproximadamente un nivel del 5 por ciento, si hay más espacio entre los datos, este nivel por supuesto baja. Se ve que esta condición es válida para la entrada y salida de las lagunas primarias, así como para las secundarias.

Para decidir entre el desempeño de las lagunas secundarias, se presenta la Tabla 19, donde para cada combinación de dos lagunas se calculó la diferencia entre la DBO₅ promedio y la suma de ambos errores estándar de la media. Se ve que las diferencias entre A2 y A3, B y C y A2 y C tienen significado en sentido estadístico.

Tabla 19. Comparación de las diferencias en la media de DBO₅ con la suma del error estándar de la media para todos los pares de lagunas secundarias.

		A2	A3	B	C
A1	Δ DBO ₅ promedio	2.8	5.8	0.3	7.9
	Σ Error estándar	8.5	8.0	7.6	8.1
A2	Δ DBO ₅ promedio		8.6	3.1	10.7
	Σ Error estándar		6.5	6.1	6.7
A3	Δ DBO ₅ promedio			5.5	2.1
	Σ Error estándar			5.6	6.1
B	Δ DBO ₅ promedio				7.6
	Σ Error estándar				5.7

Al observar los promedios en la Tabla 18, solo se observa que A1, A2 y B tienen valores de salida de aproximadamente 50 mg/L, A3 y C de aproximadamente 60 mg / L, o de otra manera se dice que las lagunas sin plantas (A3 y C) eliminan 10% y 14% menos de DBO5 en comparación con las lagunas con plantas. Sin embargo, comparando entre las lagunas con macrófitas, no se puede identificar una diferencia entre las que tenían Lemna y Phragmites.

Desde un punto de vista práctico, el efecto positivo de las plantas macrófitas, se valora en un 14% en el rendimiento de las lagunas en la eliminación de DBO₅, que representa en términos de concentración 9mg/L. Si las lagunas sin plantas macrófitas cumplen con la normativa de descarga, se podría establecer que la diferencia de remoción de los humedales contruidos no justifica el uso de plantas, dado el costo adicional de la plantación y el mantenimiento y el riesgo de inestabilidad de la cubierta vegetal. Sin embargo, otros argumentos pueden convencer a las autoridades para elegir plantas en lagunas de aguas residuales.

6.2.1.2 Relación entre la concentración de DBO5 en la salida y entrada

En esta sección se analiza la eficiencia del sistema de tratamiento en términos de concentraciones de DBO₅. En la figura 23 se presenta la relación entre las concentraciones de DBO₅ de la salida y entrada, expresadas como porcentaje y su variabilidad.

La eficiencia de las lagunas primarias es las más constante, la mitad de los datos de conjunto son menores que los valores de A2, A3, B y C, indicando que son más eficientes que las lagunas secundarias.

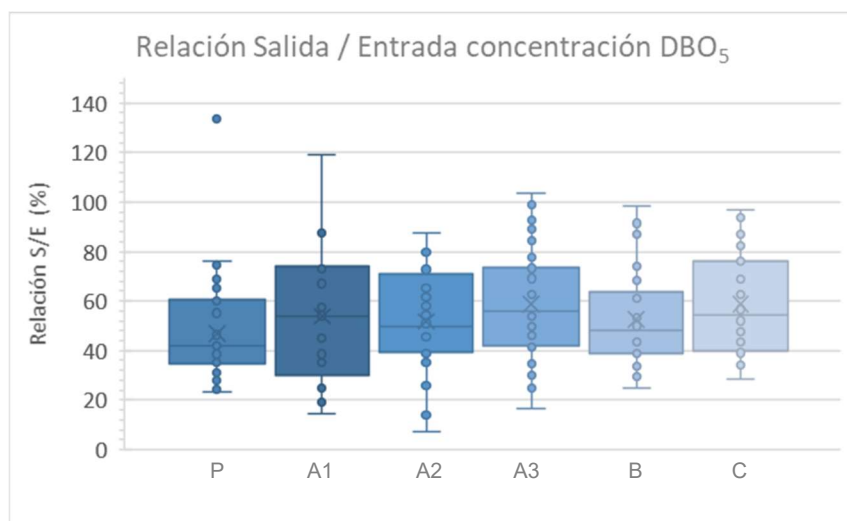


Figura 23. Gráfico de cajas para la relación Salida/Entrada de DBO₅ para las lagunas primarias y secundarias. La eficiencia de las lagunas primarias es la más constante y la mitad de los datos son menores que los valores de las lagunas secundarias indicando que son más eficientes. Las lagunas secundarias tienen valores más altos que el 100% representando producción ocasional de DBO₅ y dispersión similar en los datos (los datos de salida tienen valores atípicos en el rango alto) y dispersión debido a la combinación de datos Entrada y Salida.

La tabla 20 muestra el resumen estadístico de los datos de la relación Salida / Entrada DBO₅ para las lagunas de la estación experimental. El desempeño de las lagunas primarias es consistentemente mejor que el de las secundarias. En la Tabla 21 se realiza la comparación entre sistemas a como se hizo en la tabla 20 para cada conjunto de datos individuales. La única conclusión que se puede establecer con cierto nivel de certeza es que las lagunas primarias son más eficientes que las dos lagunas secundarias sin macrófitas, las mismas que anteriormente mostraron la menor eficiencia. Se concluye que comparando las concentraciones de la salida da conclusiones más precisas y fuertes que comparando las eficiencias.

Tabla 20. Resumen estadístico para la relación Salida/Entrada DBO₅ de las lagunas primarias (P) y lagunas secundarias (A1, A2, A3, B y C)

	P	A1	A2	A3	B	C
<i>Elementos N:</i>	47	17	28	46	36	27
<i>Mínimo:</i>	23	15	7	17	25	28
<i>Promedio:</i>	47	54	52	59	52	59
<i>Mediana:</i>	42	54	50	56	48	55
<i>Máximo:</i>	134	119	88	104	99	97
<i>Desviación estándar</i>	20	28	20	22	18	20
<i>Error estándar Media</i>	2.9	6.8	3.7	3.3	3.0	3.8

Tabla 21. Valores de Δ para la media y Σ del error estándar de la media para la relación Salida/Entrada DBO₅ para todas las lagunas.

		A1	A2	A3	B	C
P	Delta promedio	6.9	4.8	11.8	5.5	11.9
	Σ Error estándar	9.7	6.6	6.1	5.9	6.6
A1	Delta promedio		2.1	4.9	1.4	5.0
	Σ Error estándar		10.5	10.1	9.9	10.6
A2	Delta promedio			7.0	0.7	7.1
	Σ Error estándar			6.9	6.7	7.4
A3	Delta promedio				6.3	0.1
	Σ Error estándar				6.3	7.0
B	Delta promedio					6.4
	Σ Error estándar					6.8

Aparentemente las variaciones en los datos de la relación Salida/Entrada son mayores si se comparan con los datos de salida únicamente. Esto debe ser debido al error combinado que resulta de la división de los datos de salida y entrada.

En el caso de los datos de la Estación Experimental de León, podemos sacar conclusiones sobre las lagunas con plantas macrófitas, estas se comportan un poco mejor que las que no tienen plantas, ya que todas las lagunas se alimentaron el mismo flujo de entrada. Por estas razones, las mediciones de la calidad del agua de entrada no son relevantes para esta conclusión como lo hubiese sido al comparar sistemas en diferentes sitios.

6.2.1.3 Demanda química de oxígeno (DQO)

Los datos de Demanda Química de Oxígeno (DQO) son analizados de la misma forma que se hizo para la DBO₅. En la Figura 24 se presentan las gráficas de cajas de las concentraciones de DQO en los canales de entrada y salida de las lagunas de la estación experimental de León.

Los valores de concentración en la salida oscilan entre 50 -400 mg/L, mucho mayores que los valores de DBO₅. Los procesos que ocurren en las lagunas primarias y en las secundarias reducen la mediana de las concentraciones y de esta forma se puede decir que la mayor parte del tiempo se da una mejora en la calidad de agua representada por la reducción de DQO. La variabilidad de los datos es mucho menor en la salida que en la entrada de las lagunas primarias, pero en contraste con los datos de DBO₅, el paso a través de las lagunas secundarias pareciera incrementar la dispersión de los valores de DQO. No hay una explicación para esta aseveración.

La variabilidad aquí parece aproximadamente proporcional al valor de la concentración, en contraste con todas las demás medidas. Se confirma que la variabilidad de los datos de las lagunas primarias es más baja; el efecto de las lagunas secundarias parece aumentar la dispersión en los datos.

La precisión de los datos de DQO se compara desfavorablemente con los datos de DBO₅, la dispersión de los datos de DQO es mayor y la variabilidad de las concentraciones entre las lagunas es mayor que la variabilidad en las concentraciones de DBO₅. En otras palabras, las mediciones de DBO₅ son considerablemente más precisas que las de DQO.

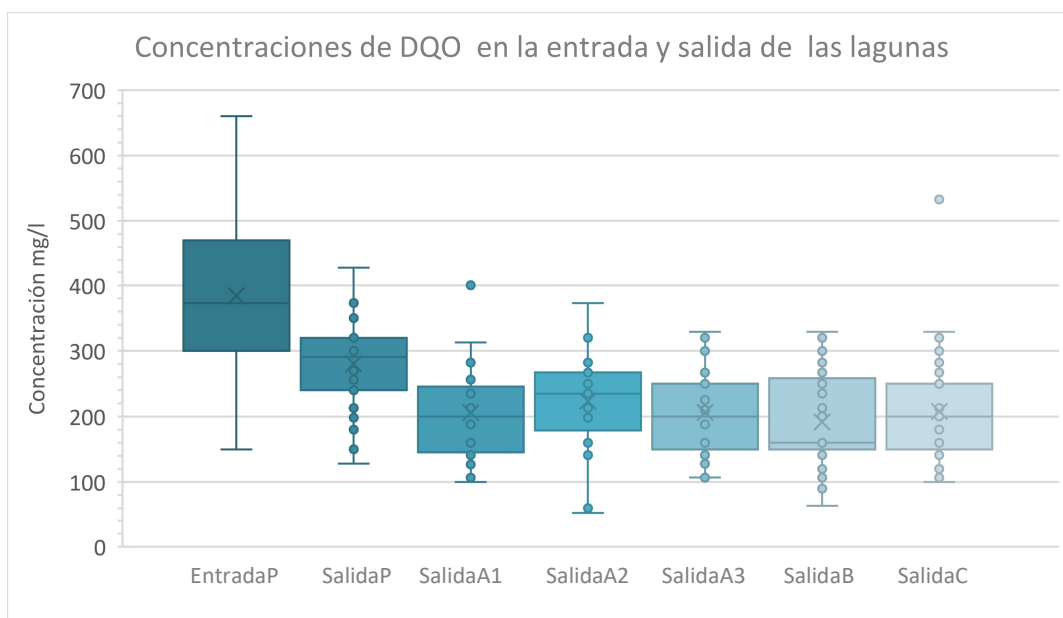


Figura 24. Gráfico de cajas para las concentraciones de DQO en los canales de entrada y salida de las lagunas de la estación experimental. Los valores de salida oscilan entre 50 y 400 mg/L. En las lagunas primarias y secundarias hay una reducción de la concentración media por lo que representa que siempre hay mejora en la calidad del agua. Hay una sobre posición considerable de los datos cuando se comparan los valores de entrada y salida de las lagunas indicando baja remoción. El efecto de las diferencias de los sistemas, como es la presencia o ausencia de macrófitas, no es grande.

Sin embargo, la DQO no muestra valores atípicos y esto es consistente con la explicación de los valores atípicos en DBO_5 dado anteriormente, ya que la DQO se mide en muestras filtradas y, por esta razón, la muestra solo contiene macromoléculas y partículas más pequeñas y sus aglomerados no desempeñan un papel en el análisis. Dado que las técnicas de muestreo son diferentes, no es práctico intentar una comparación más detallada de los resultados de DBO_5 y DQO.

En los gráficos de caja, se aprecia un valor alejado o atípico para la Laguna C (533). La laguna B pareciera trabajar mejor que la laguna A2.

La Tabla 22 muestra el resumen estadístico para los datos de DQO de las lagunas de la estación experimental. Las lagunas primarias se desempeñan mucho mejor que las lagunas secundarias.

Tabla 22. Resumen estadístico para los datos de DQO (mg/l)

	EP	SP	A1	A2	A3	B	C
<i>Elementos N:</i>	41	42	15	23	41	35	29
<i>Mínimo:</i>	150	128	100	53	107	64	100
<i>Media:</i>	384	280	206	223	206	192	208
<i>Mediana:</i>	373	291	200	235	200	160	200
<i>Máximo:</i>	660	427	400	373	329	329	533
<i>Desviación estándar</i>	118	68	83	78	60	73	88
<i>Error estándar Media</i>	18.4	10.5	21.3	16.3	9.3	12.3	16.4

En la Tabla 23 se comparan los sistemas como se hizo en la tabla 20 para datos individuales. No es posible identificar diferencias entre los desempeños de las lagunas secundarias.

Tabla 23. Comparación de las diferencias en las medias de DQO con la suma de los errores estándar de las medias para todos los pares de lagunas secundarias

		A2	A3	B	C
A1	Δ DQO promedio	17.7	0.5	13.9	2.2
	Σ Error estándar	37.6	30.6	33.6	37.7
A2	Δ DQO promedio		17.2	31.6	15.6
	Σ Error estándar		25.6	28.6	32.7
A3	Δ DQO promedio			14.4	1.7
	Σ Error estándar			21.6	25.7
B	Δ DQO promedio				16.1
	Σ Error estándar				28.7

6.2.1.4 Sólidos suspendidos totales

La figura 25 presenta las gráficas de caja de las concentraciones totales de sólidos suspendidos en los canales de entrada y salida de la Estación Experimental de León.

Los datos de Salida A1 son los más bajos pero los más variables. Las Salidas de las lagunas primarias SP y la salida de la laguna C son las menos variables. Estos conjuntos de datos presentan muchos valores atípicos. Los sólidos suspendidos son las partículas presentes en la muestra. La medición de laboratorio consiste en filtrar una cantidad de muestra y pesar las partículas retenidas en el papel de filtro. Las algas

que crecen en las lagunas forman una parte importante de los sólidos suspendidos. La interpretación de los valores atípicos como partículas más grandes es casi trivial, y es consistente con los casos de DBO_5 y bacterias.

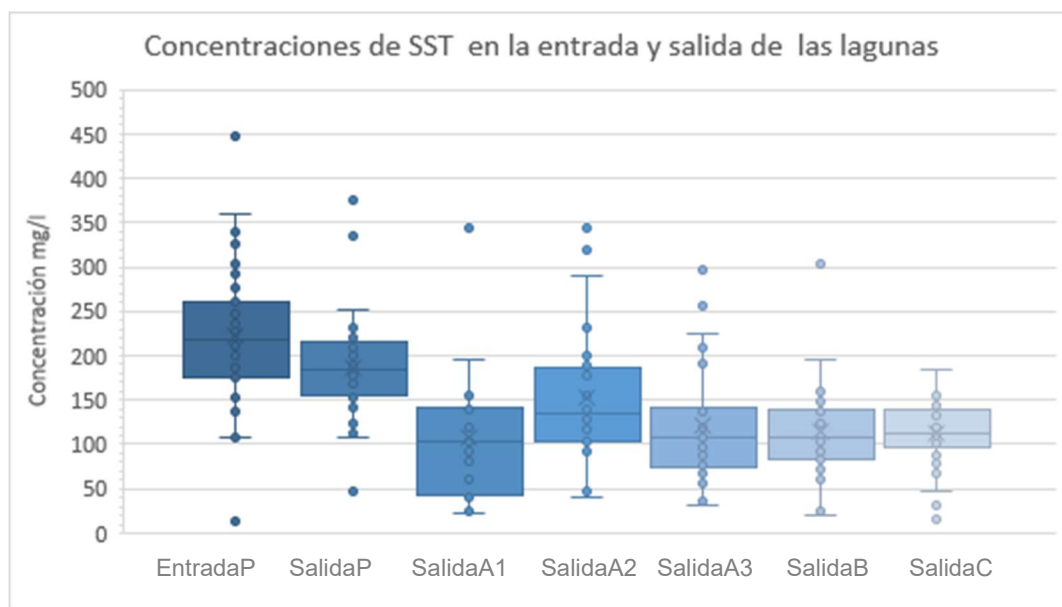


Figura 25. Gráficos de caja para las concentraciones de sólidos suspendidos en los canales de entrada y salida de las lagunas en la estación experimental.

Estos conjuntos de datos presentan muchos valores atípicos. Se observa mayor variabilidad de datos en comparación con los datos de sólidos totales, porque las mediciones de sólidos suspendidos son influenciadas por la presencia de algas que son el constituyente principal de sólidos suspendidos. Los datos de la laguna C son los menos variables. La mitad de los valores de A1, A2, B y C (aquellos mayores que la mediana) varían en el mismo rango. Los datos de Salida de A3 y B varían en el mismo rango, se observa que la presencia de plantas no hace diferencia en el desempeño de la laguna B. El mismo análisis se puede aplicar para los datos de Salida A2 y C. NO hay sobre posición de los datos de las salidas de las primarias y las salidas de A1, A3, B y C, pero los valores de salida de A2 si se superponen casi en la mitad de los datos de Salida de las primarias.

La Tabla 24 muestra el resumen estadístico de los datos de sólidos suspendidos para las lagunas de la Estación Experimental de León.

Tabla 24. Resumen estadístico para los datos de sólidos suspendidos

	EP	SP	A1	A2	A3	B	C
<i>Elementos N:</i>	47	47	17	28	45	35	28
<i>Mínimo:</i>	13	48	23	40	32	20	16
<i>Media:</i>	222	187	108	152	122	115	112
<i>Mediana:</i>	217	184	104	134	108	108	112
<i>Máximo:</i>	448	376	344	344	296	304	184
<i>Desviación Estándar</i>	76	54	80	73	62	51	38
<i>Error estándar Media</i>	11.0	7.9	19.4	13.9	9.2	8.6	7.2

La tabla 25 presenta las diferencias estadísticas entre los desempeños de las lagunas. La diferencia significativa es que A2 tiene un desempeño menos eficiente que el resto de las lagunas.

Tabla 25. Comparación de las diferencias en las medias de sólidos suspendidos con la suma de los errores estándar de las medias para todos los pares de lagunas secundarias.

		A2	A3	B	C
A1	Δ SST promedio	43.9	13.5	7.2	4.3
	Σ Error estándar	33.3	28.6	27.9	26.6
A2	Δ SST promedio		30.4	36.8	39.6
	Σ Error estándar		23.1	22.5	21.1
A3	Δ SST promedio			6.4	9.2
	Σ Error estándar			17.8	16.5
B	Δ SST promedio				2.8
	Σ Error estándar				15.8

6.2.1.5 Análisis de la variabilidad basada en las cargas de contaminantes.

En esta sección se presenta las cargas de contaminantes en las entradas y salidas de las lagunas de la estación experimental, así como su variabilidad. Las cargas se calcularon usando los flujos obtenidos del balance de agua diario presentados en la sección 6.1.3.2.

Todas las lagunas secundarias tienen las mismas concentraciones de contaminantes a la entrada dado que todas reciben la misma agua (efluente de las lagunas primarias), por lo tanto, la variabilidad de las cargas entrantes está determinada únicamente por la variabilidad de los flujos. Esto es verdad desde un sentido

físico, así como para los valores numéricos presentados en esta sección, dado que los datos de entrada se midieron únicamente una vez en la salida de las lagunas primarias, después de la unión de las salidas de las primarias y antes de que el flujo se dividiera hacia cada laguna secundaria. En contraste, la variabilidad de las cargas de contaminantes en las salidas de las lagunas secundarias debe ser el reflejo de la variabilidad de las cargas de entrada y de los procesos internos en cada laguna, así como también debe considerarse las mediciones independientes y los errores de muestreo en los datos de salida.

Dado que los flujos en las lagunas secundarias variaron en las diferentes etapas de estudio de la estación experimental, la comparación entre cargas de entrada y salida para las diferentes lagunas se graficaron de forma separada para ajustarse a los rangos de variación de los flujos.

La figura 26 muestra las cargas de DBO_5 en la entrada y salida de las lagunas secundarias A1, A2, A3 y B. Los datos son para el período cuando los flujos de A1, A2 y A3 eran aproximadamente iguales y los flujos de la laguna B eran mayores.

La Figura 27 muestra los mismos datos de la Figura 26 pero escalados como porcentaje de la mediana de cada grupo de datos. Este gráfico muestra que la variabilidad de las cargas de salida es mayor que la de las cargas de entrada en cada laguna, excepto para la laguna A3. Para esta laguna la variabilidad de las cargas entrantes es ligeramente mayor que la variabilidad de las cargas salientes.

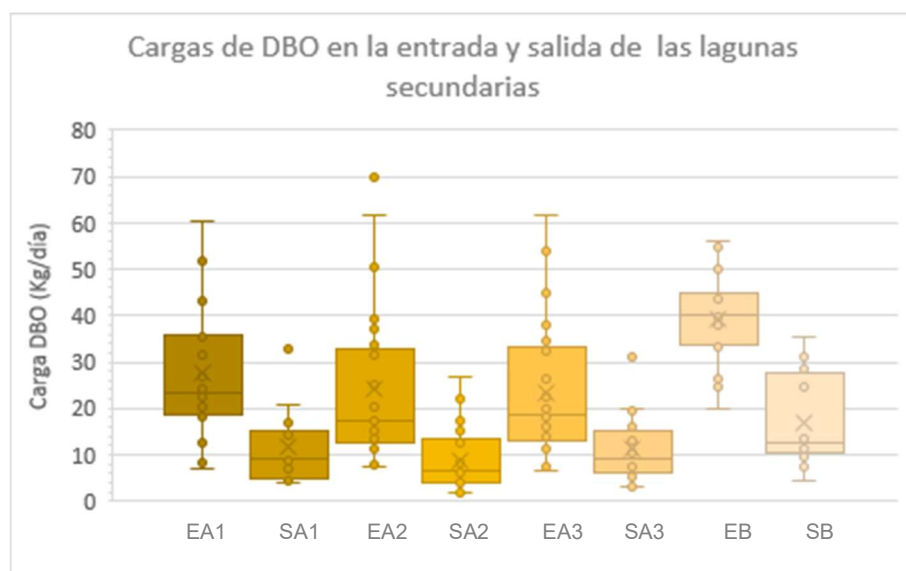


Figura 26. Cargas de DBO_5 en la entrada y salida de las lagunas secundarias de la estación experimental. Todos los conjuntos de datos están desviados hacia los valores altos excepto por las cargas de entrada de la laguna B. Las cargas de salida son significante mente menores que las de entrada, no hay sobre posición de datos cuando se comparan entrada y salida de cada laguna. Las cargas entrantes y saliente de A1, A2 y A3 varían casi en el mismo rango. Dado que el flujo entrante a las lagunas B es mayor, era de esperarse que las cargas fuesen mayores que las otras lagunas. Las cargas de entrada de la laguna B son menos variables dado que los influentes de dicha laguna son igualmente menos variables como se mostró en la figura de Anexo 3.

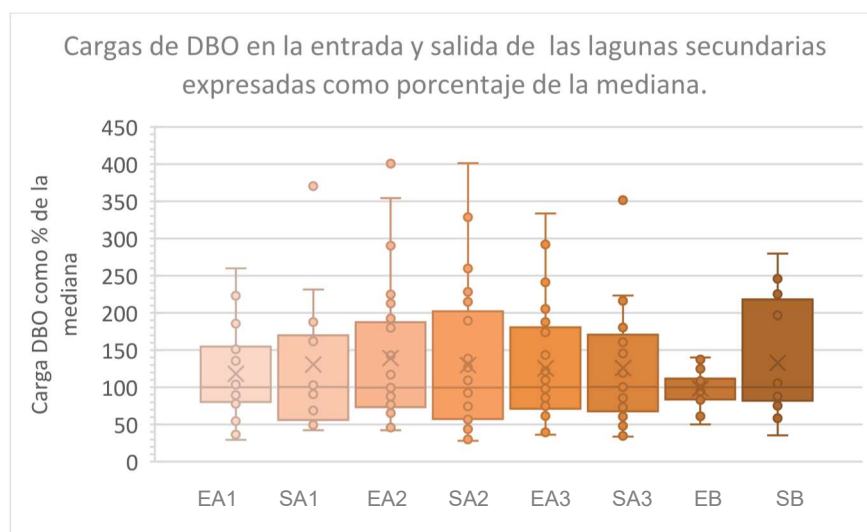


Figura 27. Cargas de DBO_5 en la entrada y salida de las lagunas secundarias de la estación experimenta escaladas como porcentaje de la Mediana. La variabilidad de las cargas de salida es mayor que la de las cargas de entrada, excepto para la laguna A3.

Las cargas de entrada muestran la variabilidad de los caudales para cada laguna, ya que las concentraciones de entrada son las mismas para todas las lagunas secundarias. Las cargas presentan mayor variabilidad que las concentraciones. Esto se debe al efecto de combinar la dispersión de las concentraciones y la dispersión de los caudales en el cálculo de la carga.

6.3 Estimación de la variabilidad en el desempeño de las lagunas convencionales y humedales construidos.

El desempeño de un sistema puede estimarse basado en su eficiencia para remover cargas o eficiencia para remover concentraciones de contaminantes. El tipo de análisis utilizado para expresar el desempeño de un sistema depende del interés del investigador, como se expuso en la Tabla 1.

En esta sección se presenta una comparación entre la remoción de cargas y la remoción de concentraciones de las lagunas de la estación experimental de León. Estas lagunas muestran una mejor remoción de cargas en comparación con la remoción de concentraciones. Parte de este efecto se debe a la evapotranspiración que incrementa las concentraciones en el flujo de salida. En realidad, este efecto es mayor, y corresponde a la cantidad de agua perdida y no contabilizada en el balance de agua. En general, el comportamiento de las cargas en las lagunas está influenciado por la inexactitud del balance de agua que conlleva a diferencias grandes y variables entre los flujos de entrada y salida.

De los gráficos de caja elaborados para los caudales de las lagunas, se pudo apreciar la diferencia en el comportamiento de las curvas diarias de los flujos de cada laguna. Esto es un efecto importante y su efecto es una de las razones de la variabilidad en el funcionamiento entre lagunas.

La figura 28 presenta las remociones de cargas y remociones de concentraciones de DBO_5 para las lagunas secundarias A1, A2, A3, B y C. L representa la remoción de cargas y C representa la remoción de concentraciones.

Para las lagunas A1, A2 y A3, ambos grupos de datos, remoción de cargas y remoción de concentraciones, presente casi la misma variabilidad. Del gráfico se puede apreciar que las eficiencias de remoción de cargas contaminantes son mayores que las eficiencias calculadas en base a remoción de concentraciones,

excepto para la laguna A1 la cual presenta porcentajes de remoción de cargas y de concentraciones en el mismo rango.

Por otro lado, para la laguna C la variabilidad de los datos de remoción de cargas es notablemente menor en comparación con los datos de remoción de concentraciones.

Para la laguna B la mitad de los valores de remociones de cargas son mayores que las remociones de concentraciones. Para la laguna C no hay sobre posición de datos cuando se comparan las remociones de carga y remociones de concentraciones.

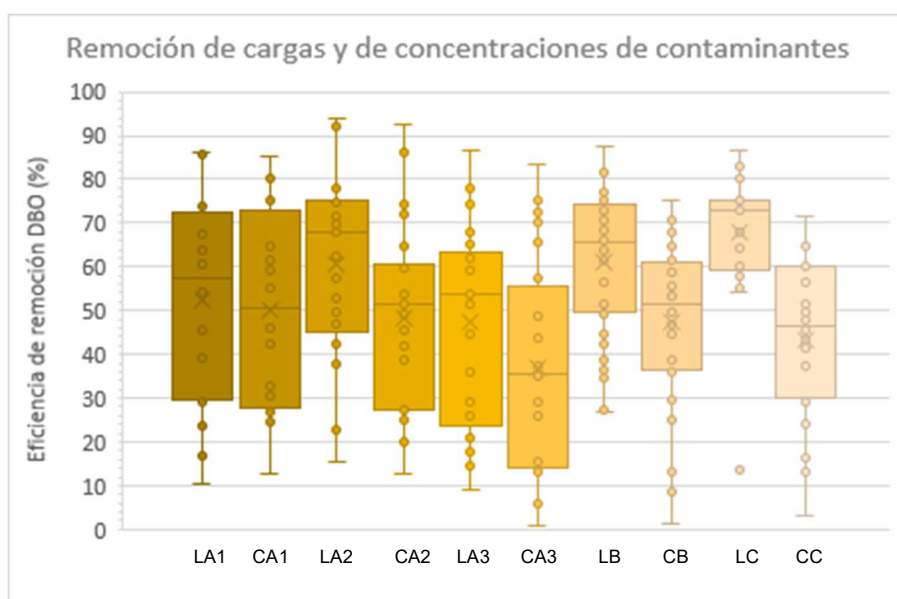


Figura 28. Remoción de cargas de DBO₅ y remoción de concentraciones de DBO₅ para las lagunas secundarias A1, A2, A3, B y C de la estación experimental. L representa remoción de cargas y C representa remoción de concentraciones.

Los datos de remoción de concentración de cada laguna son más variables. La remoción de concentración de la laguna A3 muestra la mayor variabilidad.

La variabilidad de remoción de carga para las lagunas B y C es menor, ya que los caudales de estas lagunas fueron menos variables.

La figura 29 presenta la remoción de cargas de DQO y la remoción de concentración para las lagunas secundarias. En este gráfico hay valores atípicos en el rango inferior. Algunos de estos valores atípicos

representan eficiencias negativas. La eficiencia de eliminación negativa podría generarse por la producción de DQO en las lagunas o porque el flujo de salida es mayor que el flujo de entrada.

La Laguna A1 presenta la menor diferencia entre la remoción de carga y la remoción de concentración. La remoción de carga de la laguna C es notablemente más alta que la remoción de concentración.

La remoción de concentración es más variable para todas las lagunas.

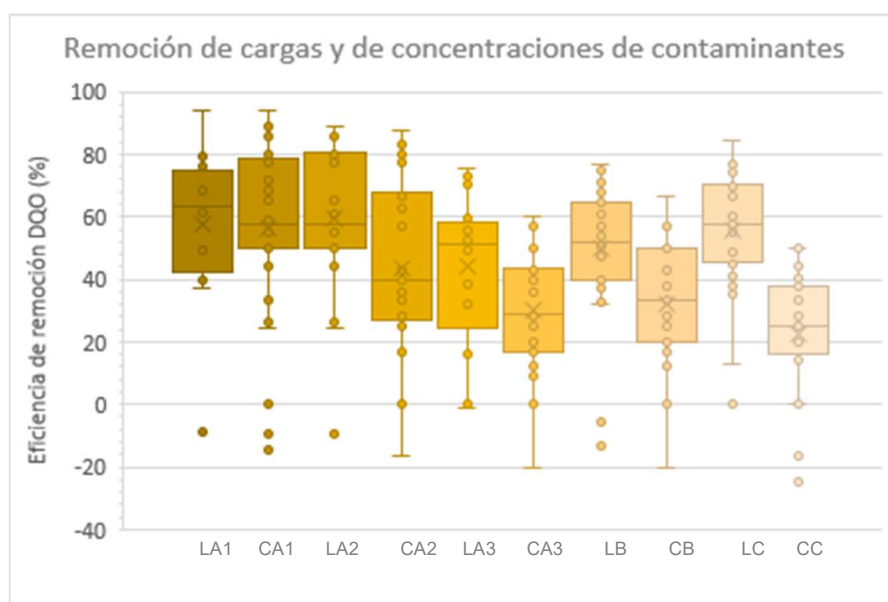


Figura 29. Remoción de cargas de DQO y remoción de concentraciones de DQO para las lagunas secundarias A1, A2, A3, B y C. L representa remoción de cargas y C representa remoción de concentraciones.

A causa del déficit de agua, las lagunas parecieran desempeñarse mejor cuando la eficiencia se analiza a partir de las cargas contaminantes. Sin embargo, este comportamiento se ve influenciado por la variabilidad de los flujos y la inexactitud de los cálculos del balance de agua. Esto se puede apreciar en el análisis hecho para los valores de $\Delta 2$ (diferencia entre flujo de entrada y salida después del balance de agua), cálculo presentado en la sección 8.1.3.2. La laguna A1 presentó los valores más bajos de $\Delta 2$ y de la misma forma esta laguna presenta las diferencias más pequeñas entre remoción de cargas y remoción de contaminantes como se muestra en las Figura 29.

Por otro lado, la laguna C presenta los valores más altos de $\Delta 2$ y esto hace que la remoción de cargas de esta laguna sea mucho mayor que las remociones de concentraciones. La diferencia entre flujo de entrada y salida incrementa la remoción de cargas.

La importancia de estudiar las condiciones hidráulicas, así como tener un balance de agua más exacto, ha sido demostrada a partir de la comparación entre las remociones de cargas y remociones de concentraciones. Cuando el desempeño de una laguna es analizado en base a remoción de cargas, se pueden establecer conclusiones falsas si el balance de agua del sistema no ha sido calculado con exactitud.

El siguiente ejemplo muestra este tipo de análisis, usando datos de nitrógeno total de dos celdas de las lagunas de la estación experimental, una con Phragmites y la otra convencional con algas. Ambas celdas tienen el mismo tamaño y reciben el mismo flujo y la misma concentración en la entrada. Con los datos de la tabla 26, se realiza a continuación una comparación entre ambos tipos de lagunas desde dos puntos de vista y se establecen las consecuencias prácticas que surgen al establecer cuál de los tratamientos se desempeña mejor.

Tabla 26. Eficiencias de remoción de nitrógeno total basadas en concentraciones y en cargas para dos celdas de la estación experimental, una celda con Lemna y la otra convencional con alga.

<i>Remoción de Nitrógeno Total Kjeldahl (%)</i>				
<i>Fecha</i>	<i>Concentración</i>		<i>Carga</i>	
	<i>Lemna</i>	<i>Alga</i>	<i>Lemna</i>	<i>Alga</i>
<i>02/26/99</i>	25	20	40	8
<i>03/06/99</i>	34	32	34	22
<i>03/19/99</i>	11	-9	25	29
<i>03/26/99</i>	50	35	56	60
<i>04/09/99</i>	0	19	9	52
<i>04/16/99</i>	22	13	26	27
<i>04/23/99</i>	12	28	16	52
<i>04/30/99</i>	29	25	43	55
<i>Media</i>	23	20	31	38
<i>Desviación estándar</i>	16	14	15	19

En las dos primeras columnas, se presenta el análisis basado en remoción de concentración, se concluye que la celda con la Lemna tiene un mejor rendimiento, ya que para la mayoría de los días evaluados muestran mayor porcentaje de eliminación.

En el segundo caso, al analizar las eficiencias basadas en la remoción de carga, la celda que funciona como un tratamiento convencional presenta los porcentajes de remoción más altos para la mayoría de los días evaluados. Por lo tanto, en función de la remoción de la carga, se concluye que el tratamiento convencional tiene un mejor rendimiento.

Estas conclusiones son contradictorias y representan los resultados del análisis desde dos puntos de vista diferentes.

Para las mediciones realizadas el 19 de marzo de 1999, si el análisis se basa en concentraciones, se concluye que la celda con algas produce nitrógeno total y muestra una eficiencia negativa. Sin embargo, en función de la eliminación de carga, esta celda elimina el 33%. En este caso, el efecto de los flujos en la evaluación realizada es muy grande. Por lo tanto, se muestra cómo difieren las conclusiones según el análisis.

Las siguientes tablas muestran las mediciones realizadas durante tres días en las celdas A1 y A3 de la Estación Experimental de León. La Tabla 27 muestra las concentraciones de entrada - salida y el porcentaje de remoción para cada celda. La Tabla 28 muestra las cargas aplicadas y la remoción basada en la carga. La Tabla 29 muestra los flujos de entrada y salida de cada celda. Estas tablas permiten analizar la influencia de los flujos en la remoción de carga.

Tabla 27. Concentraciones de entrada (CE) y salida (CS) de Nitrógeno total para las celdas A1 y A3. Eficiencias basadas en concentraciones.

FECHA	CEA1	CSA1	COUT A3	REMOCIÓN DE CONC A1	REMOCIÓN DE CONC A3
	mg/L	mg/L	mg/L	%	%
03-06-99	21	14	14	34	32
03-19-99	21	18	22	11	-9
05-28-99	16	24	18	-50	-12,5

Tabla 28. Cargas de nitrógeno total aplicadas y remanentes para las celdas A1 y A3. Eficiencias basadas en cargas.

FECHA	CARGA EA1	CARGA EA3	CARGA STA1	CARGA SA3	REMOCIÓN CARGA A1	REMOCIÓN CARGA A3
	Kg/ha/d	Kg/ha/d	Kg/ha/d	Kg/ha/d	%	%
03-06-99	15,7	13,5	9,8	9,9	38	27
03-19-99	24,7	21,9	17,9	14,8	27	33
05-28-99	15,0	13,7	17,3	9,9	-15	28

Tabla 29. Influentes y Efluentes de las celdas A1 y A3

FECHA	INFLUENTE A1	INFLUENTE A3	EFLUENTE A1	EFLUENTE A3
	L/s	L/s	L/s	L/s
03-06-99	1,3	1,1	1,3	1,3
03-19-99	2,1	1,9	1,8	1,2
05-28-99	1,6	1,5	1,3	1,0

Para el primer caso (03-06-99), ambas celdas tienen la misma remoción basada en concentración ya que tienen la misma concentración de salida, 14mg / L. Sin embargo, según la carga, A1 tiene una mejor remoción (38%). Incluso cuando la carga aplicada a A1 es mayor, la carga restante es menor ya que el flujo de salida para A1 es menor que su flujo de entrada. Sin embargo, para A3, el flujo de salida es mayor que el flujo de entrada, por lo que esto causa una eliminación de carga más baja.

En el segundo caso (03-19-99), A3 produce nitrógeno total y, en base a la remoción de la concentración, tiene una eficiencia negativa. En este caso, A1 funciona mejor, ya que reduce la concentración total de

nitrógeno. Sin embargo, en función de la carga, A3 presenta una mejor remoción. En cuanto a los caudales, se observa que los flujos para A1 son mayores y esto aumenta las cargas aplicadas y restantes.

En el tercer caso (05-28-99), ambas celdas producen nitrógeno total en lugar de eliminarlo. Si se analiza la remoción de concentración, se obtienen eficiencias negativas. Si el juicio se basa en la eliminación de la carga, la celda A3 obtiene una eficiencia de eliminación del 28%, pero la celda A1 obtiene una eficiencia negativa. Al analizar las entradas y salidas, se observa que la salida para A3 es aproximadamente el 35% de su entrada; esto hace que la carga restante sea más pequeña y provoca su eliminación. Para A1, incluso cuando el flujo de salida también es más pequeño que su entrada, la diferencia entre ellos no es lo suficientemente grande para reducir la carga restante e indicar la remoción.

Estudiar la remoción de concentración es útil para determinar si el sistema cumple con los límites permitidos para descargar a un cuerpo receptor. En este tipo de análisis, las condiciones hidráulicas del sistema no son de interés. Pero, si el análisis se basa en la remoción de carga, es importante tener una buena estimación del balance de agua del sistema, ya que se podrían extraer conclusiones falsas cuando se desconocen las condiciones hidráulicas.

Cada análisis químico, como es el caso de la DBO_5 tiene su inexactitud intrínseca. Esto significa que, si se analiza un gran número de muestras idénticas, permanece cierta variabilidad en los datos mientras que también se observa un límite inferior, el límite de detección. Esta variabilidad surge por todas las pequeñas variaciones en el procedimiento y por errores inherentes de medición en el proceso. Algunos ejemplos son la medición de volumen de adiciones y diluciones, errores de concentración en reactivos, límites de precisión en el detector (titulación de Winkler en este caso).

Una segunda fuente de errores en el trabajo de campo puede surgir en el muestreo, almacenamiento y manejo de las muestras antes de ser transportadas al laboratorio para su análisis final, así como al tiempo y las condiciones bajo las cuales se almacenan las muestras en el laboratorio.

Sería ideal que la magnitud de este error intrínseco fuese conocida, ya que solo entonces el investigador podrá determinar si la variabilidad observada en los datos de campo se debe a errores en procedimientos

de laboratorio, a errores en el muestreo y manejo o a variabilidad que ocurre en el sistema que se está investigando.

Estas fuentes de errores están abiertas a investigación y, si es posible, se debe prestar atención a este tema. En la práctica, los recursos invertidos en una investigación se reembolsarán ahorrando tiempo y dudas durante el análisis final de los datos. Por lo general, también será posible una formulación más directa de los resultados, ya que habrá menos causas para explicar las anomalías y, en general, mejorará el poder de convicción de una investigación.

Las fuentes de variabilidad más interesantes, por supuesto, reflejan las propiedades del sistema que se está investigando. Tales sistemas pueden ser variables en el espacio y en el tiempo, por muchas razones y en muchas escalas. Esta variabilidad puede ser intrínsecamente de naturaleza estadística, pero en el campo es más comúnmente un reflejo de procesos que no están bien representados por la escala de tiempo y/o la escala espacial del procedimiento de medición. Algunos buenos ejemplos se presentaron en la Sección 6.1.3.2 sobre el balance hídrico cuando los efectos de la lluvia no pueden analizarse más, ya que solo se conocen 24 valores integrados de lluvia, y no el momento exacto cuando esta ocurre.

Las muestras para el análisis de DBO_5 fueron tomadas en el campo mediante una pequeña botella. El resultado de la medición representa la cantidad de oxígeno consumido por la población residente de bacterias que utilizan los sustratos para su metabolismo. Generalmente, al trabajar con aguas residuales, la muestra es diluida con agua que contiene oxígeno; de otra forma el análisis iniciaría sin oxígeno para ser tomado por las bacterias, o, con un agua residual altamente concentrada, el contenido de oxígeno de la muestra sería cero antes de que los cinco días del análisis transcurrieran. Ahora, los microorganismos así como el sustrato puede presentarse en diferentes tamaños. Desde células individuales con tamaño de casi 1 micrón, moléculas individuales, hasta agregados de 1cm o más. La persona que toma la muestra normalmente evita tomar grandes agregados, pero estos representan una cantidad significativa de DBO_5 en el agua residual. A partir de la botella que se toma la muestra en las lagunas, el laboratorista toma una sub-muestra usando una pipeta y la incuba durante cinco días, después de ese tiempo se mide el consumo total de oxígeno. La toma de muestra con la pipeta discrimina las partículas grandes por segunda vez, lo que podría conllevar a una subestimación sistemática de la DBO_5 que realmente está presente en las lagunas. Otros efectos podrían ocurrir durante el transporte y movimiento de la muestra original, los

agregados presentes podrían o no desintegrarse y así se podrían o no sub muestrear en el laboratorio. Esto llevaría a un aumento general de las variabilidades o, más probablemente, si fuese un evento aislado, generaría una distribución sesgada y valores atípicos en el lado alto de la mediana. O más explícitamente, para que surja un valor alto debido a este fenómeno, una gran partícula debe estar presente en la botella original de la muestra y debe romperse antes de pipetear la sub-muestra a analizar. Cuando solo se recogen pequeños agregados en el campo, el muestreo inicial no es el problema, pero si estos se rompen o dispersan en el sub muestreo, esto causaría una cantidad significativa de DBO_5 en la botella. El número de pequeños agregados puede ser mucho más variable en comparación con las sustancias disueltas y las bacterias presentes en la muestra.

De hecho, se puede observar que los datos para las mayorías de las lagunas están desviados hacia los valores altos, y los valores atípicos solo se dan en el rango alto. Esta desviación en los datos puede ser explicada por las razones expuestas en los párrafos anteriores; sin duda es necesaria una investigación más a fondo. Básicamente, se podría esperar bajo este supuesto que el efecto es aún más pronunciado con las mediciones de bacterias vivas como *Escherischia coli*.

Estas fuentes de error pueden reducirse promediando, en un sentido físico, mediante tomas de muestras compuestas: muestreando volúmenes más grandes a lo largo del tiempo, agitándolas bien y realizando sub-muestreos. De esta manera se pueden obtener resultados más precisos, en lugar de perder información por realizar procesos rápidos o a pequeña escala.

La Tabla 30 presenta un resumen de las diferencias en porcentajes de remociones de concentraciones significativas entre el rendimiento de las lagunas con plantas acuáticas y sin ellas.

Tabla 30. Diferencias entre el desempeño de las lagunas con algas y lagunas con planta macrófitas.

Parámetro	Alga	Lemna	Alga	Phragmites a.
DBO ₅		+9.7%		+14.3%
DQO		+0.2%		+7.0%
Sólidos suspendidos totales		+3.9%	+2.5%	
Fósforo total		+30.5%		+2.3%
Nitrógeno total		+2.1%		+1.5%
Nitrógeno orgánico	+16.2%			
Amonio	+25.5%		+8.2%	
Sólidos totales		+0.5%		+2.2%
Coliformes Fecales		+2.7%		+21.3%

Las diferencias entre el rendimiento de las lagunas con y sin plantas acuáticas son variables para cada parámetro analizado desde el punto de vista de remoción de concentraciones de sustancias. La diferencia más significativa es la mejor remoción de Fósforo Total para la laguna con Lemna que presentó 30.5% más que las lagunas con algas.

Otros parámetros con mejor remoción fueron DBO₅ para la laguna con Phragmites que presentó 14% mejor remoción.

De igual forma la laguna con Phragmites también presentó mejor remoción para Coliformes Fecales sin embargo, la concentración a la salida no estuvo dentro de los parámetros de descarga de la normativa nacional.

Para el resto de parámetro que no hay un beneficio significativo al cultivar plantas acuáticas en lagunas de aguas residuales. Sin embargo, la decisión de utilizar humedales construidos puede justificarse por otras razones. Por ejemplo, la reutilización de las plantas acuáticas para alimentar a los animales o para cultivar peces si hay recursos humanos y económicos disponibles.

Las lagunas de aguas residuales con macrófitas también pueden diseñarse y operarse para proporcionar hábitats de humedales de alta calidad para las aves acuáticas y otros animales salvajes. En algunos casos, estos sistemas también proporcionan un área para la educación pública y la recreación (USEPA, 1993).

CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES

1. El uso del Análisis Exploratorio de Datos (AED) y elementos de estadística descriptiva de tendencia central fueron útiles para estudiar el comportamiento de los conjuntos de datos y detectar anomalías en estos.
2. La inexactitud en las mediciones de los niveles de agua en las lagunas, realizadas a partir de una regla graduada con precisión de 1cm y sujeto a la percepción de la persona que realiza la lectura, contribuye a la variabilidad de los datos relacionados con los caudales del sistema que a su vez afecta el balance de agua. De igual forma, los datos de precipitación con registros diarios no contribuyen a un balance de agua exacto.
3. Las técnicas de muestreo y medición de elementos como la DBO_5 y los coliformes fecales contribuyen a la variabilidad de los datos. La presencia de partículas en la muestra colectada causa alteración de los valores de dichos análisis.
4. Al analizar la eficiencia de varias lagunas, la comparación de las concentraciones de salida de las lagunas proporciona conclusiones más precisas y más sólidas que la comparación de la relación salida / entrada, ya que la dispersión del término de la relación es significativamente mayor en comparación con los datos de salida únicamente. En el caso de la Estación Experimental de León, las conclusiones pueden extraerse sólo del análisis de los datos de salida, ya que todas las lagunas secundarias analizadas reciben la misma agua de entrada. Sin embargo, las mediciones de la calidad del agua de entrada son esenciales si se deben sacar conclusiones de los datos recopilados en diferentes sitios y en diferentes momentos.
5. Las diferencias más notables entre el mejor rendimiento de las lagunas con macrófitas y las lagunas sin plantas acuáticas fueron de 14% en el caso de DBO_5 con el uso de Phragmites y 30% en el caso de Fósforo total que la laguna con Lemna destacó su mejor eficiencia de remoción. Sin embargo, para el resto de parámetros las diferencias oscilan entre 2% y 8%.

6. Las lagunas sin plantas acuáticas presentaron mejor remoción de Amonio y Nitrógeno Orgánico, 25% y 16% respectivamente, eso representa una diferencia de 1.2mg/l y 1.7mg/l en términos de concentraciones.
7. Las lagunas secundarias de la Estación Experimental de León presentan un mejor funcionamiento cuando el análisis se basa en su eliminación de carga. La diferencia entre la entrada y la salida debido al efecto de la evapotranspiración, el déficit de agua y la inexactitud en el cálculo del balance de agua influyen en este comportamiento.
8. Cuando la eficiencia de un sistema se estima en función de la eliminación de la carga, se podrían sacar conclusiones falsas si las condiciones hidráulicas del sistema no son bien conocidas.
9. Se confirma la hipótesis planteada. La variabilidad en el funcionamiento de las lagunas y humedales contruidos de la estación experimental se ve determinada por la inexactitud en el cálculo de los flujos de agua que por ende afecta el balance de agua de cada sistema y el cálculo de las cargas contaminante. De igual forma el tipo de análisis realizado para determinar la eficiencia de un sistema puede establecer conclusiones contradictorias si un sistema es analizado en base a remoción de concentraciones o en base a remoción de cargas.

CAPÍTULO VIII. RECOMENDACIONES

A partir de los resultados de este estudio, se pueden sugerir nuevos temas para investigar; por lo tanto, se presentan algunas recomendaciones para trabajos futuros. Además, se dan algunas recomendaciones sobre cómo manejar los conjuntos de datos de humedales y qué técnicas estadísticas aplicar.

1. Utilizar Análisis Exploratorio de Datos tales como las gráficas de cajas para facilitar el análisis inicial de un conjunto de datos por parte de cualquier investigador que desee tener acceso a la información para futuros trabajos.
2. Un sistema de laguna diseñado para la investigación debe tener varias lagunas que reciban la misma agua de entrada. Esto facilita la comparación del rendimiento entre las lagunas en función de las concentraciones de salida, ya que se reduce la dispersión de los datos.
3. Aumentar la precisión de la medición del nivel del agua en las lagunas de 1 cm a 1 mm y una frecuencia de hasta 15 minutos para investigar el efecto de la evapotranspiración.
4. Las mediciones de la lluvia deben realizarse también con una frecuencia de 15 minutos para apreciar el efecto de la precipitación en el flujo y en el volumen de las lagunas.
5. Investigar los términos de error de las técnicas de medición y muestreo de elementos como DBO₅ y coliformes fecales para estimar el grado de variabilidad de los datos debido a los errores de medición. Dichos datos son necesarios para un análisis más profundo de los datos de lagunas con plantas macrófitas, como base para mejorar la técnica de medición y para una mejor planificación de la investigación.
6. El uso de humedales construidos también puede integrar programas de investigación, educación, recreación y hábitat de vida silvestre.

CAPÍTULO IX. BIBLIOGRAFÍA

- Alaerts, G.J., M.D. Rahman Mahbubar & P. Kelderman, (1996). *Performance analysis of a full-scale duckweed-covered sewage lagoon*. *Water Research*, 30(4), 843-852. doi: 10.1016/0043-1354(95)00234-0
- Al-Nozaily, F.A., (2000). Duckweed-Covered Sewage Lagoons: Performance and Process Analysis. The case of Sana'a, Yemen. Tesis de doctorado inédita. IHE, The Netherlands.
- Baldizón, M.E., (2001). Aplicación de plantas macrofitas en el tratamiento de las aguas residuales, El Cocal, León (Tesis de maestría, en preparación), PIENSA, UNI, Managua.
- Baldizón, M.E., Dolmus R. & Quintana, J., (2000) a. Informe Integral de la aplicación de plantas macrofitas en el sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas. El Cocal, León.
- Baldizón, M.E., Dolmus R. & Quintana, J., (2000) b. Manual de operación y mantenimiento de Lagunas de estabilización con macrofitas. El Cocal, León.
- Boer, E.G.J., (1997). Unfinished Thesis. Delft University of Technology.
- Breen, P.F., (1990). A mass balance method for assessing the potential of artificial wetlands for wastewater treatment. *Water Research*. 24 (6), 689-697. doi:10.1016/0043-1354(90)90024-Z
- Brix, H., (1993). Wastewater treatment in constructed wetlands: System design, removal processes, and treatment performance. En G.A. Moshiri (ed.), *Constructed wetlands for water quality improvement*. (pp. 9-22). United States, Lewis Publisher.
- Chambers, J.M., Cleveland W.S., Kleiner B. & Tukey P.A. (2017). *Graphical methods for data analysis*. United States, Chapman & Hall/CRC Press. ISBN 9781315893204
- Cooke, J.G., (1994). Nutrient transformations in a natural wetland receiving sewage effluent and the implications for waste treatment. *Water Science & Technology*, 29 (4), 209-217.

- Cooper, P.F., G.D. Job, M.B. Green & R.B.E. Shutes, (1996). Reed beds and constructed wetlands for wastewater treatment. Australia, WRc Publications.
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L. & Andrade, M. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales, Bolivia. Centro A.G.U.A. UMSS. ISBN 9789995476625
- Denny, P., (1996). Implementation of constructed wetlands in developing countries. 5th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, Viena.
- Dolmus, R., (2006). Utilización de Plantas Acuáticas en Lagunas de tratamiento de aguas residuales El Cocal, León. (Tesis de maestría, UNAN, León). Recuperado de <http://www.riul.unanleon.edu.ni:8080/jspui/retrieve/518>
- Gearheart, R.A., B.A. Finney, M. Lang & J. Anderson, (1999). Free-Surface wetland technology assessment. 6th National Wastewater Treatment Technology Transfer
- Haberl, R. & R. Perfler, (1991). Nutrient removal in a reed bed system. Water Science & Technology, 23 (4-6), 729-737.
- Hammer, D.A. & R.L. Knight, (1994). Designing constructed wetlands for nitrogen removal. Water Science & Technology, 29 (4), 15-27.
- Hey, D.L., K.R. Barret & C. Biegen, (1994). The hydrology of four experimental constructed marshes. Ecological Engineering, 3 (4), 319-343. doi: 10.1016/0925-8574(94)00006-9
- Hiley, P.D., (1995). The reality of sewage treatment using wetlands. Water Science & Technology, 32 (3), 329-338. doi: 0.1016/0273-1223(95)00633-8
- Izaak Walton League of America, (2015). Water Words Dictionary. Recuperado de <http://www.state.nv.us/cnr/ndwp/dict-1/waterwds.htm>
- Kadlec, R.H. & Wallace, S.D., (2009). Treatment Wetlands. Taylos&Francis Group.

- Karnchanawong, S. & Sanjitt, J., (1995). Comparative study of domestic wastewater treatment efficiencies between facultative pond and water spinach pond. *Water Science & Technology*, 32 (3), 263-270. doi: 10.1016/0273-1223(95)00627-3
- Koottatep, T. & Polprasert, C. (1997) Role of plant uptake on nitrogen removal in constructed wetlands located in tropics. *Water Science & Technology*, 36 (12), 1-8. doi: 10.1016/S0273-1223(97)00725-7
- Kuehn, E. & J.A. Moore, (1995). Variability of treatment performance in constructed wetlands. *Water Science & Technology*, 32 (3), 241-250. doi: 10.1016/0273-1223(95)00625-7
- Lazo, N., García, I., Jarquín, V. (2000). Evaluación de las lagunas secundarias con macrófitas, "El cocal". Fase Experimental - II Etapa. Tesis de pregrado inédita. Universidad Nacional de Ingeniería, Nicaragua.
- León, G., (1995). Aspectos generales y principios básicos de las lagunas de estabilización. Seminario Internacional: Lagunas de Estabilización. Santiago de Cali, Colombia.
- Mandi, L., Houhoum, B., Asmama, S. & Schwartzbrod, J., (1996). Wastewater treatment by reed beds an experimental approach. *Water Research.*, 30 (9), 2009-2016. doi: 10.1016/0043-1354(96)00032-2
- Mandi, L., K. Bouhoum & N. Ouazzani, (1998). Application of constructed wetlands for domestic wastewater treatment in an arid climate. *Water Science & Technology*, 38 (1) 379-387. doi: 10.1016/S0273-1223(98)80004-8
- Martin, C.D. & Moshiri, G.A. (1994). Nutrient reduction in an in-series constructed wetland system treating landfill leachate. *Water Science & Technology*, 29 (4), 267-272.
- Metcalf & Eddy, (2003). *Wastewater Engineering. Treatment and Reuse*. Fourth Edition, McGraw-Hill.
- Moore, J.A., S.M. Skarda & R. Sherwood, (1994). Wetland treatment of pulp mill wastewater. *Water Science & Technology*, 29 (4), 241-247.

- Moreno, S., (1994). Apuntes de Hidrología de Superficie. Universidad Nacional de Ingeniería. Printart Editores, Managua.
- NIST (National Institute of Standards and Technology), (2010). Engineering Statistic Handbook. Recuperado de <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda>
- Olgúin, E., Hernández, E., Coutiño, P. y González, R., (2002). Aprovechamiento de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales. Tecnologías ambientales para el desarrollo sustentable. ISBN 968-7213-63-9
- Ostrom, A.J.van & J.M. Russell, (1994). Denitrification in constructed wastewater wetlands receiving high concentration of nitrate. *Water Science & Technology*, 29 (4), 7-14.
- Pérez, T., Barbosa, M., Pérez, J. (2000). Evaluación de las lagunas de estabilización secundarias con macrófitas del barrio El Cocal de la ciudad de León. Fase Experimental - I. Tesis de pregrado inédita. Universidad Nacional de Ingeniería, Nicaragua.
- Perkins, J. & C. Hunter, (2000). Removal of enteric bacteria in a surface flow constructed wetland in Yorkshire, England. *Water Research*, 34 (6), 1941-1947. doi: 10.1016/S0043-1354(99)00333-4
- Rangeby, M., Johansson, P. & Pernrup, M., (1996). Removal of Faecal Coliforms in a wastewater stabilization pond system in Mindelo, Cape Verde. *Water Science & Technology*, 34 (11), 149-157. doi: 10.1016/S0273-1223(96)00832-3
- Reyes, V., Vanegas C., (2017). Definición del método de cálculo de la Carga Superficial Máxima (CSM) para el diseño de lagunas de Estabilización Facultativa de la zona del pacífico de Nicaragua. Tesis de Maestría inédita. UNI, Nicaragua.
- Salzburg University (1994). A new city map of León (Nicaragua). Recuperado de <http://www.geo.sbg.ac.at/projects/leon/planeng.htm>

U.S. Environmental Protection Agency. Office of research and development. Manual de Diseño. Pantanos contruidos y sistemas de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales. 1988, Cincinnati, Ohio. EPA/625/1-88/022

U.S. Environmental Protection Agency. (1993). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment and Wildlife Habitat. 17 Case Studies. September. EPA 832-R-93-005

United States Environmental Protection Agency. (2017) Wetlands Protection and Restoration. Recuperado de <http://www.epa.gov/OWOW/wetlands/index.html>

CAPÍTULO X. ANEXOS

ANEXO 1: MAPA DE UBICACIÓN ESTACIÓN EXPERIMENTAL LEÓN

Estación Experimental León. Está localizada al suroeste de la ciudad de León en las coordenadas 86°53'20" de longitud oeste y 12°26'33" de latitud norte, a 75 m sobre el nivel del mar.

ANEXO 2: FOTOGRAFIAS ESTACIÓN EXPERIMENTAL



Foto 1. Flujo de entrada al sistema. Caja repartidora de caudales con vertederos triangulares ajustables, vertederos con ángulo de 90° . Fuente: Lazo, N., García, I., Jarquín, V. (2000)



Foto 2. Lagunas Primarias, cada una de 1 ha de área, operan en paralelo. Fuente: Lazo, N., García, I., Jarquín, V. (2000)



Foto 3. El efluente combinado de las lagunas primarias se alimenta a través de un canal rectangular hasta una caja distribuidora con un vertedero lineal triangular. Fuente: Lazo, N., García, I., Jarquín, V. (2000)



Foto 4. Laguna Secundaria A con celdas en paralelo. Celda A1 tiene la planta flotante *Lemna*, celda A2 tiene la planta emergente *Phragmites australis* y celda A3 sin plantas acuáticas. Fuente: Lazo, N., García, I., Jarquín, V. (2000)



Foto 5. Las celdas de la laguna secundaria B en serie y tienen planta emergente *Phragmites australis*. Fuente: Lazo, N., García, I., Jarquín, V. (2000)



Foto 6. Laguna Secundaria C. Fuente: Lazo, N., García, I., Jarquín, V. (2000)



Foto 7. Laguna conformada en el terreno, sin impermeabilización en su fondo ni en taludes. Proceso de siembra de la *Phragmites Australis*. Fuente: Pérez, T., Barbosa, M., Pérez, J. (2000)



Foto 8. Aforo volumétrico de caudales en vertedero triangular. Fuente: Pérez, T., Barbosa, M., Pérez, J. (2000)

ANEXO 3: ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS (AED)

El análisis exploratorio de datos (AED) es un tipo de análisis que deja a un lado la típica suposición sobre el tipo de modelo que sigue un conjunto de datos y usa un análisis más directo dejando que los mismos datos revelen su estructura y modelo. AED no es solo un conjunto de técnicas; AED es una filosofía de como analizar un conjunto de datos; que buscamos; como vemos los datos; y que interpretamos.

AED es un mecanismo de análisis de datos que emplea una variedad de técnicas para:

1. Maximizar dentro de un conjunto de datos.
2. Descubrir tendencias internas.
3. Extraer variables importantes.
4. Detectar valores atípicos o anomalías.
5. Evaluar suposiciones.

Las técnicas del AED nos ayudan a trabajar con un conjunto de datos de cierta manera informal, guiándonos hacia una estructura de datos de una forma rápida y fácil. Los buenos practicantes de las estadísticas siempre han visto a detalle los datos antes de presentar resúmenes estadísticos y prueba de hipótesis. El análisis exploratorio de datos nos provee con un repertorio extenso de métodos para el estudio detallado de un conjunto de datos.

La mayoría de las técnicas de Análisis Exploratorio de Datos son de naturaleza gráfica con unas pocas técnicas cuantitativas. La razón de la considerable confianza en las gráficas es que, por su naturaleza, permiten al AED y al analista tener una mente abierta durante la exploración, permitiendo a los datos revelar su estructura y tendencia interna, y a menudo proporcionar información insospechada presente dentro de los datos (NIST, 2000).

Gráficas de caja

Las gráficas de caja son un método estadístico para graficar datos. Este tipo de gráficas muestran la ubicación de la distribución básica de un conjunto de datos como la mediana, el primer y tercer cuartil, las barreras que indican la extensión de los datos más allá de los cuartiles y los valores atípicos si existieran.

Las gráficas de caja se construyen como se muestra en la Figura A3.1.

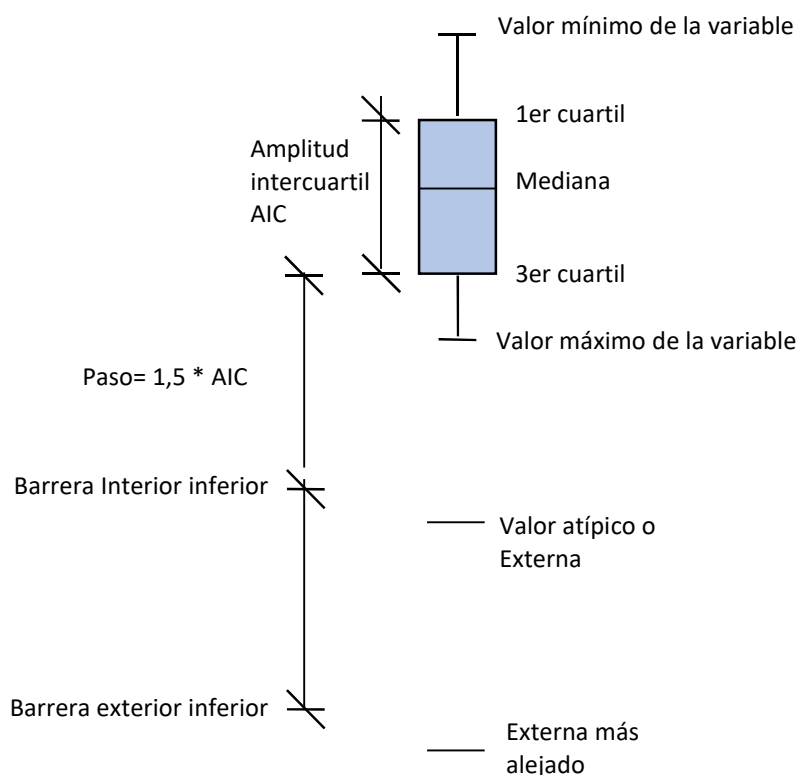


Figura A3.1. Las gráficas de caja muestran la ubicación de la distribución básica de un conjunto de datos como la mediana, el primer y tercer cuartil, las barreras que indican la extensión de los datos más allá de los cuartiles y los valores atípicos si existieran.

El gráfico consiste en un rectángulo (caja) donde los lados más largos muestran el recorrido intercuartílico.

El rectángulo está dividido por un segmento vertical que indica la mediana.

La mediana es el valor en el medio del conjunto de datos o la media de los dos valores intermedios.

Primer Cuartil: La mediana de la mitad menor de los datos.

Tercer Cuartil: La mediana de la mitad mayor de los datos.

El rectángulo se ubica a escala sobre un segmento que tiene como extremos los valores mínimos y máximos de la variable. Estos segmentos que quedan a la izquierda y a la derecha de la caja se llaman bigotes.

“Paso” es el valor de la amplitud intercuartil multiplicada por 1.5.

Las barreras internas están un paso fuera de los bigotes.

Las barreras externas están dos pasos fuera de los bigotes.

Si la diferencia (distancia) entre los percentiles 75 y 25 es H , entonces los valores atípicos son aquellos que están más allá de $1.5H$ pero no más que $3H$ por debajo del cuartil más bajo, o sea valores entre la barrera interior y exterior. Los valores atípicos más alejados son valores que están por lo menos $3H$ sobre el cuartil más alto o $3H$ bajo el cuartil más pequeño, eso significa que son valores fuera de las barreras exteriores (Tukey, 1977).

Un gráfico de caja permite rápidamente tener una visión de la ubicación, escala (ancho) y una forma estimada de la distribución de los datos. Por ejemplo, si los cuartiles altos y bajos de un gráfico de caja están a la misma distancia de la mediana, entonces la distribución de los datos es aproximadamente simétrica en el medio.

Los gráficos de caja proveen una impresión visual de diferentes aspectos importantes de la distribución empírica de un conjunto de datos. Esta presentación visual es útil para comparar varios conjuntos de datos. Dibujando un gráfico de caja para cada conjunto y colocándolos uno al lado del otro, podemos comparar el conjunto de cajas en relación con su ubicación y dispersión, así como asimetría dado que los “bigotes” muestran la dispersión, la asimetría y los valores atípicos de un conjunto de datos. Cuando varios gráficos se muestran en un diagrama, a cierta escala, es posible comparar las características de los datos y la posición de los bigotes en el diagrama a escala (figura A3.2).

Dado que la mediana y los cuartiles son resistentes al impacto de algunos datos muy atípicos, la gráfica de cajas es igualmente resistente a esa influencia. Específicamente, hasta el 25% de los datos pueden ser arbitrariamente atípicos (dispersos) sin interferir grandemente en la mediana, los cuartos o la caja rectangular en el gráfico de cajas.

Esta propiedad de los gráficos de caja los hace atractivos para el uso del Análisis Exploratorio de Datos.

Los gráficos de cajas son una herramienta excelente para reunir ubicación y variaciones en un conjunto de datos, particularmente para detectar e ilustrar cambios en las ubicaciones y variaciones de diferentes grupos de datos.

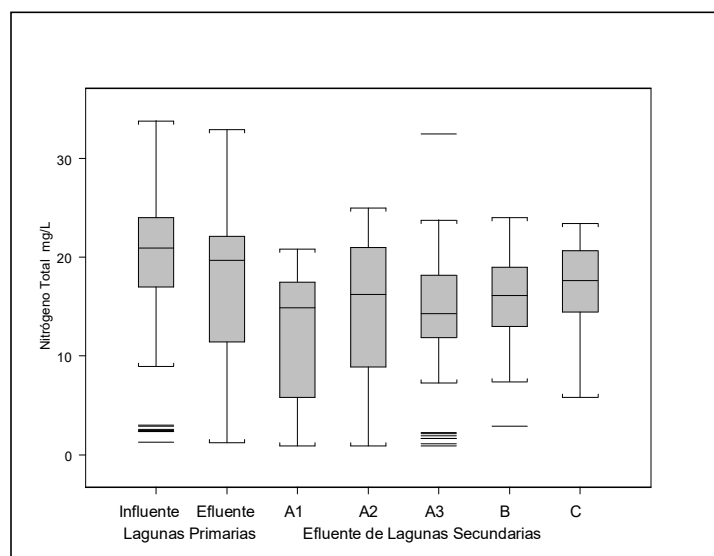
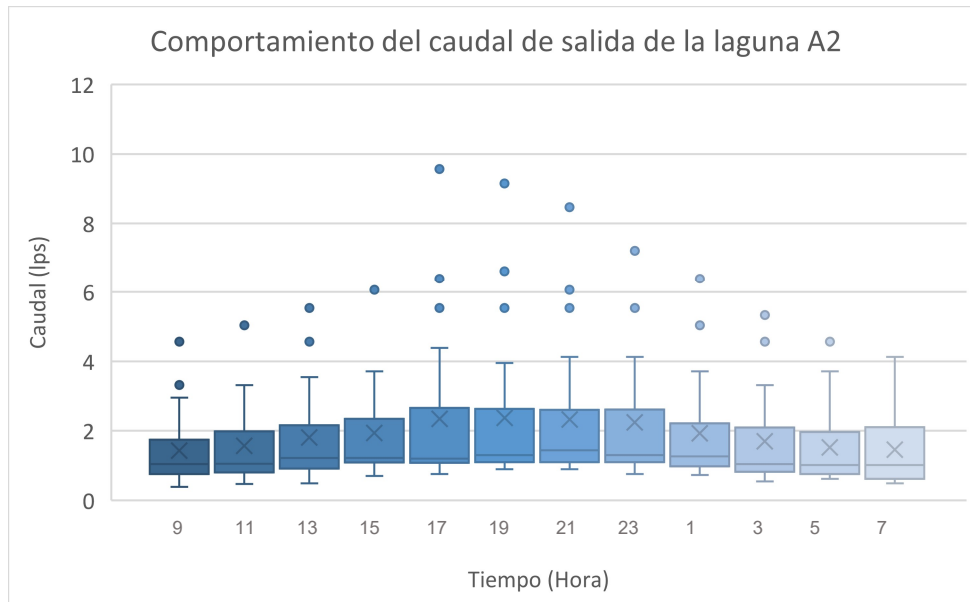
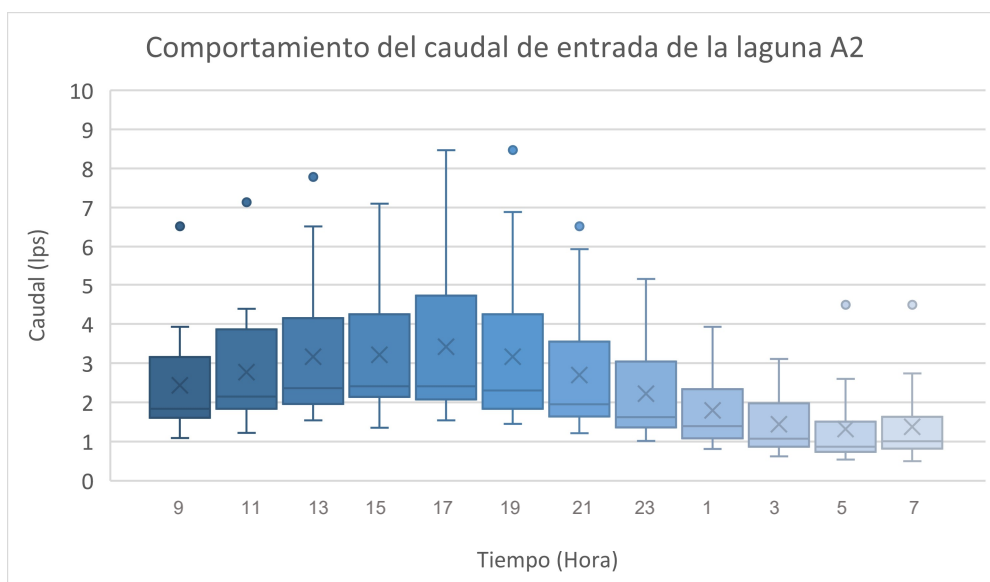
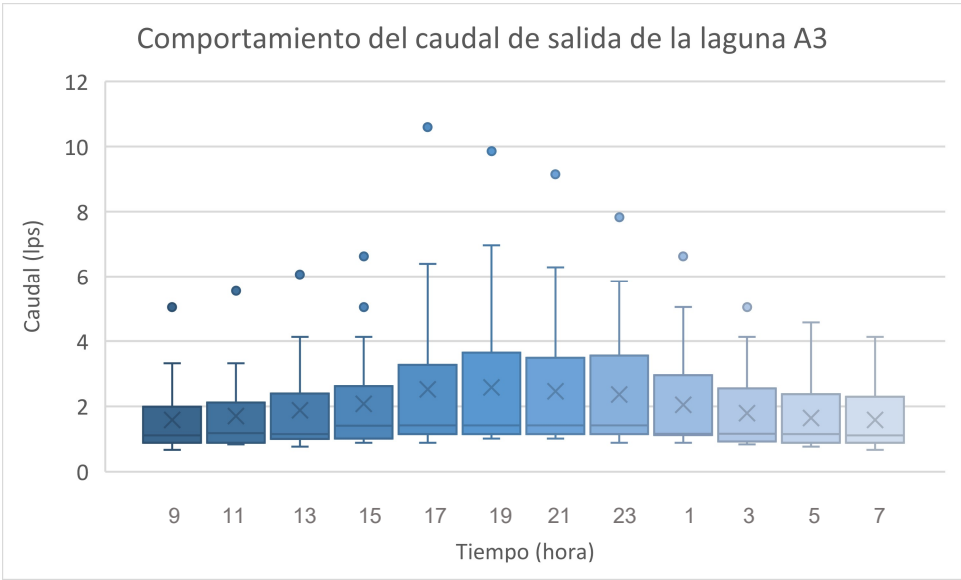
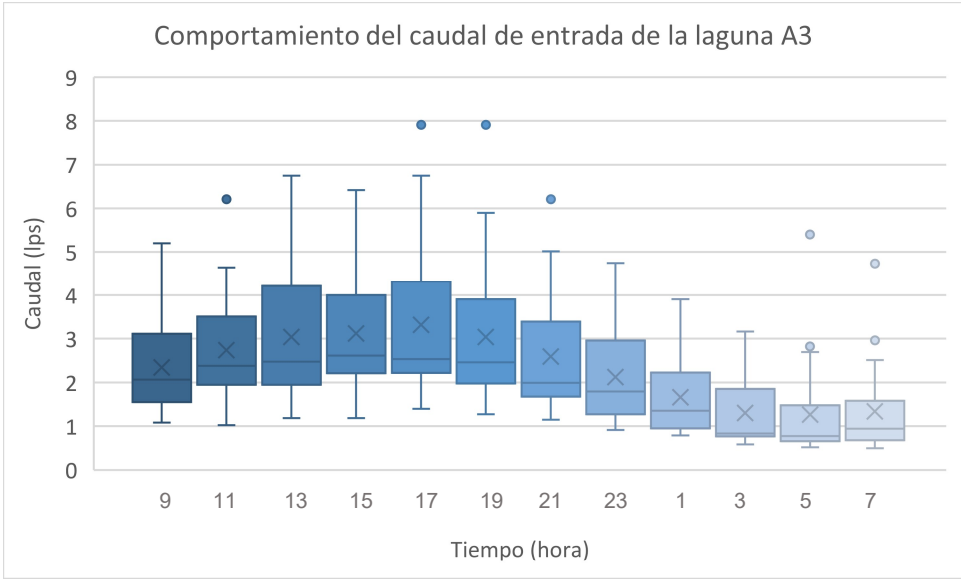


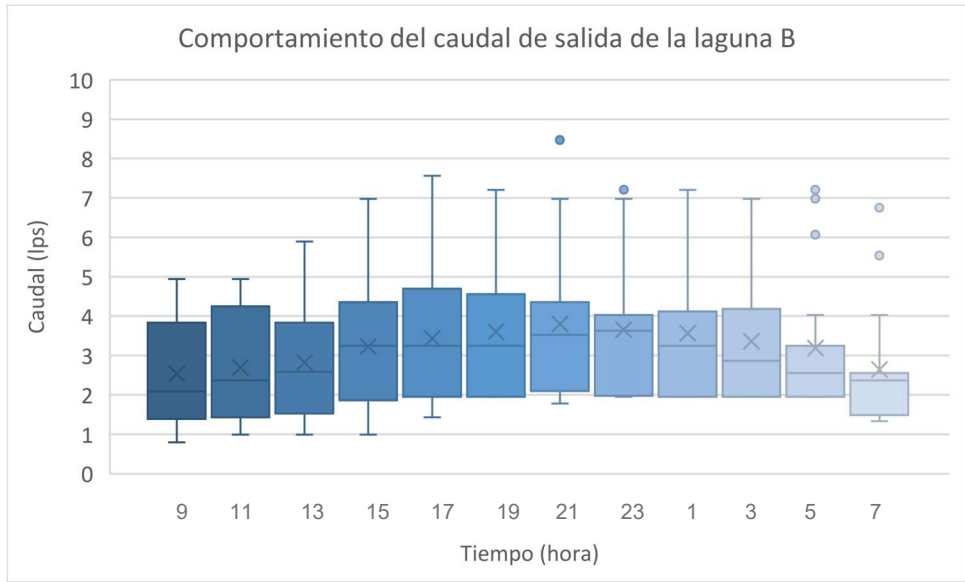
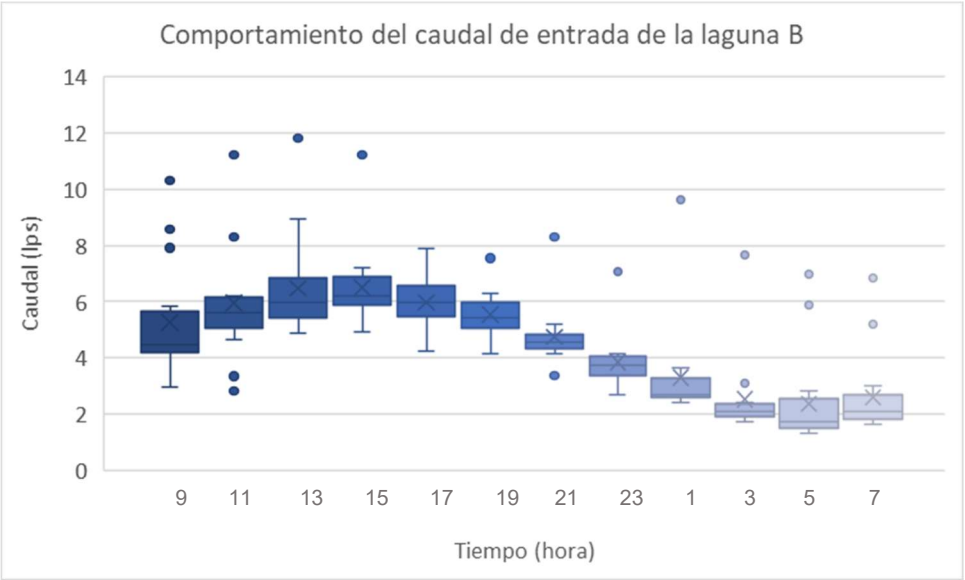
Figura A3.2. Gráfico de cajas de las concentraciones de Nitrógeno total en las lagunas de la Estación Experimental de León. Los gráficos de caja proveen una impresión visual de diferentes aspectos importantes de la distribución empírica de un conjunto de datos. Los gráficos de cajas con una herramienta excelente para reunir ubicación y variaciones en un conjunto de datos, particularmente para detectar e ilustrar cambios en las ubicaciones y variaciones de diferentes grupos de datos.

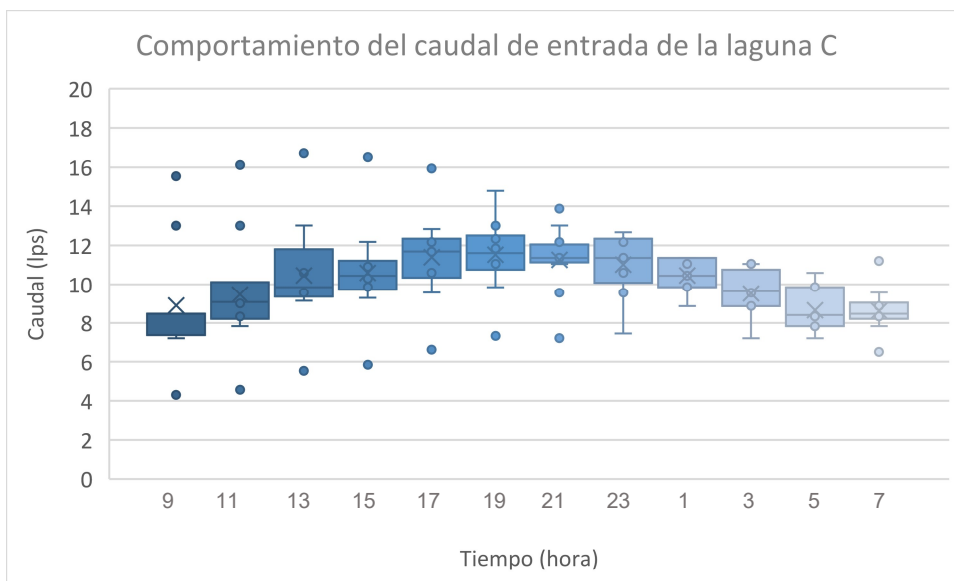
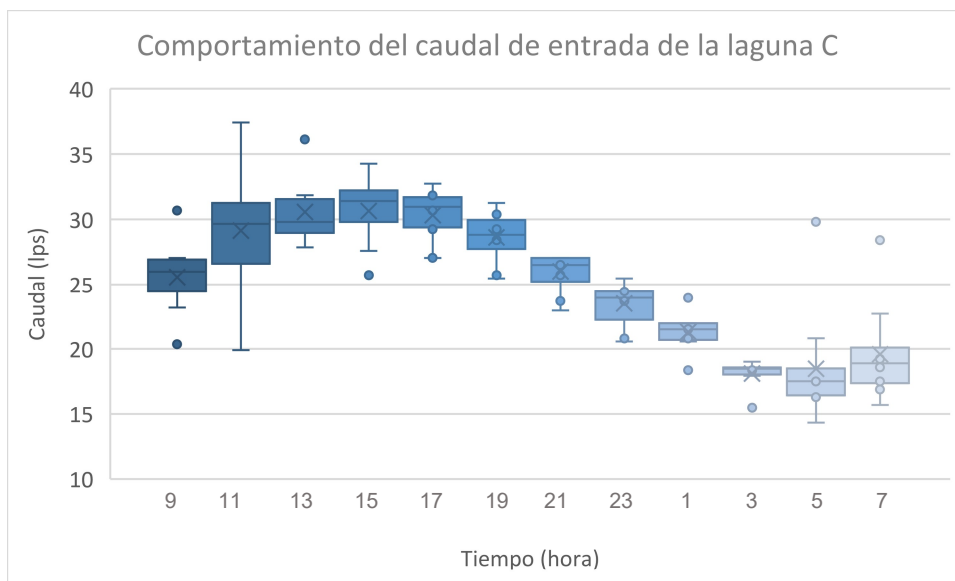
En la medición de datos pueden presentarse datos extremos atípicos, son datos que se localizan muy alejados del grupo principal de datos. Los extremos pueden darse, por ejemplo, por errores de medición o por errores de escritura cuando se introducen los valores en una base de datos. En tales casos, es deseable que los valores extremos no afecten los resultados del análisis.

También es posible que los valores extremos no se den erróneamente, sino que algunos valores sean realmente diferentes del resto. Los valores extremos pueden dar como resultados nuevas hipótesis y nuevos proyectos para investigación. En cualquier caso, los gráficos de datos revelan los valores extremos o atípicos, de manera que estos puedan ser descartados o atendidos con atención especial.

ANEXO 4: GRAFICAS DE COMPORTAMIENTO DE LOS CAUDALES DE ENTRADA Y SALIDA DE LAS LAGUNAS SECUNDARIAS.







ANEXO 5: GRAFICAS DE COMPORTAMIENTO DE LAS CONCENTRACIONES DE ENTRADA Y SALIDA DE LAS LAGUNAS PRIMARIAS Y SECUNDARIAS.

